



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## TEPELNÝ MODEL KABINY AUTOMOBILU PRO HIL SIMULACI

THERMAL MODEL OF VEHICLE CABIN FOR HIL SIMULATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Michael Chromiak**

**VEDOUČÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Glos**

**BRNO 2018**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**  
Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Michael Chromiak

**ID:** 186093

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Tepelný model kabiny automobilu pro HIL simulaci

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte modelování tepelných systémů a principy popište v rešerši.
2. Vytvořte tepelný model kabiny automobilu v prostředí Matlab/Simulink.
3. Sestavený model podrobně popište v semestrální práci.
4. Vytvořte rozhraní modelu pro řídicí jednotku (AD, DA, CAN, LIN)
5. Sestavený model a jeho implementaci do mikrokontroléru popište v bakalářské práci.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 8072250302.

SPAKOVŠZKY, Z. S. Thermodynamics and Propulsion [online]. [cit. 2017-09-06]. Dostupné z:  
<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/notes.html>

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Glos

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Táto bakalárska práca sa zaoberá tvorbou tepelného modelu kabíny automobilu v prostredí Matlab/Simulink a jeho následnou implementáciou do mikrokontroléru, ako aj tvorbou potrebného rozhrania modelu pre komunikáciu s riadiacou jednotkou automobilu. Pre návrh modelu kabíny bol použitý reálny automobil, na ktorom bolo následne vykonané kontrolné meranie správnosti počítania modelu. Pomocou nameraných dát bola taktiež namodelovaná klimatizácia konkrétneho typu automobilu, vďaka čomu je možné samotný model v mikrokontroléry vytváraný pomocou jazyku C možné používať pre vývoj aj bez riadiacej jednotky automobilu. Z porovnania nameraných a simulovaných údajov je jasné, že vytvorený model je možné použiť pre vývoj riadiacich algoritmov klimatizácii automobilov.

## **Klíčová slova**

Tepelný model, Kabína automobilu, Matlab, Simulink, Simscape, HIL Simulácia, Dynamický systém

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with the creation of the thermal model of a vehicle cabin in the Matlab / Simulink environment and its subsequent implementation into the microcontroller, as well as with the creation of the necessary model interface for communication with the car control unit. A real car was used to design the cabin model, which was followed by a control measurement of the model's calculation accuracy. Using the measured data, the HVAC system of a modelled vehicle type was also made, making it possible to use the model itself in C-based microcontrollers for development also without the car's control unit. From the comparison of the measured and simulated data it is clear that the created model can be used for the development of control algorithms for vehicle HVAC systems.

## **Keywords**

Thermal Model, Vehicle Cabin, Matlab, Simulink, Simscape, HIL Simulation, Dynamic system

### **Bibliografická citace:**

CHROMIAK, M. *Tepelný model kabiny automobilu pro HIL simulaci*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Glos.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tepelný model kabiny automobilu pro HIL simulaci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 10. května 2018

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské Ing. Janu Glosovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 10. května 2018

.....  
podpis autora

# Obsah

1	ÚVOD .....	1
2	MODELOVANIE TEPELNÝCH SYSTÉMOV .....	2
2.1	Teplo .....	2
2.2	Merná tepelná kapacita .....	2
2.3	Mechanizmy prenosu tepla .....	2
2.3.1	Prenos tepla vedením .....	3
2.3.2	Prenos tepla prúdením .....	3
2.3.3	Prenos tepla žiarením .....	5
2.4	Dynamika tepelných procesov .....	7
2.5	Zdroje tepla v systéme .....	7
2.5.1	Slnko .....	7
2.5.2	Človek .....	8
2.5.3	Klimatizácia .....	8
2.6	Vzduch .....	8
2.6.1	Suchý a vlhký vzduch .....	8
2.7	Spôsoby riešenia simulácie .....	10
2.7.1	Matlab-Simulink .....	10
2.7.2	HIL Simulácia .....	11
2.7.3	Opis kabíny a niektorých materiálov používaných pri jej výrobe .....	12
3	TVORBA TEPELNÉHO MODELU KABÍNY AUTOMOBILU .....	13
3.1	Popis kabíny automobilu a použitých materiálov .....	14
3.1.1	Karoséria .....	14
3.1.2	Časť medzi karosériou a interiérom .....	16
3.1.3	Interiér .....	16
3.1.4	Sedačky .....	17
3.1.5	Okná .....	18
3.1.6	Vzduch v kabíne auta .....	21
3.1.7	Zdroje tepla v kabíne auta .....	22
3.2	Výber Solveru v Simulinku .....	23
3.2.1	Spojité verzia modelu .....	23
3.2.2	Diskrétna verzia modelu .....	23
3.2.3	Porovnanie diskrétného a spojitého modelu .....	24
3.3	Výsledné priebehy teplôt v modeli .....	25
3.3.1	Zaparkované auto počas horúceho bezveterného letného dňa .....	25
3.3.2	Zaparkované auto počas chladného jesenného dňa so spustenou klimatizáciou, 2 ľuďmi v aute a miernym vetrom .....	26
3.3.3	Jazda autom počas zimného slnečného dňa .....	27

3.3.4	Zaparkované auto počas striedania dňa a noci v lete .....	27
3.4	Meranie kabíny automobilu.....	29
4	Implementácia modelu do mikrokontroléru .....	32
4.1	Využité periférie, vstupné a výstupné porty .....	32
4.2	Opis algoritmov v mikrokontroléry.....	33
4.2.1	main.c.....	33
4.2.2	modelCabine INIT .....	34
4.2.3	Endless loop .....	35
4.3	Komunikácia s riadiacou jednotkou automobilu .....	36
4.3.1	Prijímanie údajov .....	36
4.3.2	Odosielanie údajov .....	36
4.4	Spracovanie údajov z mikrokontroléru .....	40
4.4.1	Displej.....	40
4.4.2	Shell Interface - Putty .....	41
4.5	Porovnanie výpočtu mikrokontroléru a spojitého modelu.....	43
5	HIL Simulácia.....	44
	ZÁVER.....	46
	LITERATÚRA.....	47
	ZOZNAM PRÍLOH.....	50



# Zoznam symbolov a skratiek

## Skratky:

HIL	-	Hardware in the Loop
CAR CPU	-	Riadiaca jednotka automobilu ( Car Central processing unit )
PWM	-	Pulzne šírková modulácia ( Pulse-Width modulation)
Obr.	-	Obrázok
Tab.	-	Tabuľka
cit.	-	Citované
č.	-	Číslo
r.v.	-	Rok výroby
Al	-	Hliník
Cu	-	Meď
C	-	Uhlík
Mg	-	Horčík
ABS	-	Akrylonitrilbutadiénstyrén
Win	-	Okná z vnútornej strany kabíny automobilu
Wout	-	Okná z vonkajšej strany kabíny automobilu
inter	-	interiér v kabíne automobilu
btw	-	časť medzi interiérom a karosériou v kabíne automobilu
seat	-	sedačky v kabíne automobilu
bwork	-	karoséria automobilu
air	-	vzduch v kabíne automobilu

## Symboly:

$c$	-	Merná tepelná kapacita materiálu [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\phi$	-	Tepelný tok [ W ]
$\phi_v$	-	Tepelný tok pri prenose tepla vedením ( kondukcia ) [ W ]
$\phi_P$	-	Tepelný tok pri prenose tepla prúdením ( konvekcia ) [ W ]
$\phi_{\dot{z}}$	-	Tepelný tok pri prenose tepla žiarením [ W ]
$\alpha$	-	Súčiniteľ prestupu tepla ( konvekcia ) [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$\alpha_n$	-	Súčiniteľ núteného prestupu tepla ( nútená konvekcia ) [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$\lambda$	-	Súčiniteľ tepelnej vodivosti ( kondukcia ) [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$d$	-	Hrúbka materiálu [ m ]
$r$	-	Charakteristický rozmer ( hydraulický polomer ) [ m ]
$V$	-	Objem materiálu [ $m^3$ ]
$S$	-	Plocha materiálu [ $m^2$ ]
$\rho$	-	Hustota materiálu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho_v$	-	Hustota suchého vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\rho_{DA}$	-	Hustota suchej časti vzduchu [ kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{VP}$	-	Hustota vodnej pary obsiahnutá vo vzduchu [ kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{celk}$	-	Celková hustota vlhkého vzduchu [ kg·m <sup>-3</sup> ]
$m$	-	Hmotnosť materiálu [ kg ]
$\dot{m}$	-	Hmotnostný prietok vzduchu [ kg·s <sup>-1</sup> ]
$N$	-	Počet
$Q$	-	Teplo [ J ]
$T$	-	Termodynamická teplota [ K ]
$\Delta T$	-	Teplotný rozdiel [ K ]
$T_T$	-	Teplota teplejšieho materiálu [ K ]
$T_S$	-	Teplota studenšieho materiálu [ K ]
$\frac{dT}{dt}$	-	Derivácia termodynamickej teploty za jednotku času [ K ]
$T_0$	-	Teplota trojného bodu vody [ K ]
$\mu$	-	Dynamická viskozita daného plynu alebo kvapaliny [ kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$v$	-	Rýchlosť prúdenia vzduchu [ m·s <sup>-1</sup> ]
$Re$	-	Reynoldsove číslo [ - ]
$Pr$	-	Prandtlovo číslo [ - ]
$Nu_{turb}$	-	Nusseltova korelácia pre nútenú konvekciu [ - ]
$\sigma$	-	Stefan-Boltzmannova konštanta ( $\sigma = 5.670373 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )
$h_{fg}$	-	Merné skupenské teplo (specific latent heat) pri tlaku $p_0$ ( $h_{fg} = 2\,257\,000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$M_A$	-	Molárna hmotnosť suchého vzduchu ( $M_A = 0.028964 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
$M_V$	-	Molárna hmotnosť vodnej pary ( $M_V = 0.0180153 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
$R$	-	Molárna plynová konštanta ( $R = 8.3144624 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$R_M$	-	Molárna plynová konštanta ( $R_M = 461.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$p_v$	-	Tlak vzduchu [ Pa ]
$p$	-	Tlak vzduchu [ Pa ]
$p_{v^*}$	-	Tlak rovnovážneho bodu vodnej pary vo vzduchu [ Pa ]
$p_0$	-	Tlak trojného bodu vody - predpokladáme konštantný ( $p_0 = 611 \text{ Pa}$ )
$p_v$	-	Tlak nasýtenej vodnej pary vo vzduchu [ Pa ]
$\varphi$	-	Relatívna vlhkosť vzduchu [ % ]
$x$	-	Merná vlhkosť vzduchu [ - ]
$\varepsilon$	-	Emisivita materiálu [ - ]
$D$	-	Strieda (Duty cycle) [ % ]
$t_{air}$	-	Teplota vzduchu v kabíne automobilu [ °C ]
$\tau$	-	Časová konštanta RC článku [ s ]
$R_{RC}$	-	Odpor rezistoru RC článku [ $\Omega$ ]
$C_{RC}$	-	Kapacita kondenzátoru RC článku [ F ]

# Zoznam obrázkov a grafov

Obr. 1: Prenos tepla v rovinnej stene .....	2
Obr. 2: Prenos tepla vedením .....	3
Obr. 3: Prenos tepla prúdením.....	5
Obr. 4: Modelovaný automobil.....	12
Obr. 5: Časti vplývajúce na teplotu vzduchu v kabíne automobilu .....	13
Obr. 6: Blokový diagram smeru prestupov tepla.....	14
Obr. 7: Modelový subsystém karosérie .....	15
Obr. 8: Modelový subsystém časti medzi interiérom a karosériou .....	16
Obr. 9: Modelový subsystém interiéru.....	17
Obr. 10: Modelový subsystém sedačiek.....	18
Obr. 11: Modelový subsystém časti okien z vnútornej strany .....	19
Obr. 12: Modelový subsystém časti okien z vonkajšej strany.....	21
Obr. 13: Modelová referencia modelu kabíny automobilu .....	24
Obr. 14: Termogram sedačiek po zahriatí kabíny .....	29
Obr. 15: ApplicationKit TC277D .....	32
Obr. 16: Ilustračný opis použitých portov a periférii.....	32
Obr. 17: Blokový diagram hlavnej časti programu.....	33
Obr. 18: Blokový diagram konfiguračnej časti programu .....	34
Obr. 19: Blokový diagram nekonečnej slučky .....	35
Obr. 20: Opis pinov CAN konektoru .....	36
Obr. 21: Simscape schéma pre návrh RC článku .....	38
Obr. 22: Ukážka výpisu dát na displej .....	40
Obr. 23: Ukážka výpisu dát pomocou Shell Interface do Putty pre CSV v Matlabe.....	41
Obr. 24: Blokový opis HIL simulácie .....	44
Graf č. 1: Horúci letný slnečný deň bez ľudí, bez jazdy, bez klimatizácie.....	25
Graf č. 2: Chladný jesenný zamračený deň s 2 ľuďmi so spustenou klimatizáciou ..	26
Graf č. 3: Chladný zimný deň so 4 ľuďmi a so spustenou klimatizáciou.....	27
Graf č. 4: Jednotlivé teploty častí auta pri striedaní letného dňa a noci.....	28
Graf č. 5: Teplota vzduchu v aute .....	30
Graf č. 6: Porovnanie simulovanej a nameranej teploty vzduchu .....	31
Graf č. 7: Závislosť striedy na teplote vzduchu.....	37
Graf č. 8: Vstupný priebeh napätia RC článku pri $D(t_{air}) = 0,5$ .....	39
Graf č. 9: Výstupný priebeh napätia RC článku pri $D(t_{air}) = 0,5$ .....	39
Graf č. 10: Detail výstupného priebehu prúdu RC článku pri $D(t_{air}) = 0,5$ .....	40
Graf č. 11: Porovnanie výpočtu mikrokontroléru a spojitého modelu .....	43
Graf č. 12: Údaje namerané počas HIL simulácie .....	45

# Zoznam tabuliek

Tab. 1: Emisivita povrchu materiálov pri $T \sim 300K$ .....	6
Tab. 2: Niektoré materiály a ich vlastnosti použité pre jednotlivé časti kabíny auta .....	12
Tab. 3: Ustálené hodnoty teplôt jednotlivých častí kabíny .....	28

# 1 ÚVOD

Teplota vzduchu vnútri kabíny automobilu ovplyvňuje vodiča, ako aj celú posádku. Najmä u vodiča automobilu je potrebná maximálna tepelná pohoda, nakoľko je jedným z faktorov, ktoré môžu ovplyvniť jeho pozornosť.

Pred začatím riešenia zadania tejto práce bude potrebné vykonať súhrn teoretických poznatkov potrebných ku správneému riešeniu zadanej úlohy.

Hlavným cieľom tejto práce bolo vytvorenie tepelného modelu kabíny automobilu realizovaného formou diferenciálnych rovníc popisujúcich teploty, ktoré budú zostavené v Simulinku. Na zadávanie jednotlivých parametrov popisujúcich kabínu automobilu bude vytvorený skript v Matlabe.

Z pohľadu posádky automobilu, je možné pre ovplyvnenie teploty vzduchu počas jazdy v aute využiť klimatizáciu alebo otvorenie okien.

Preto model dostane na vstup časový priebeh prietoku vzduchu a teploty z klimatizácie, ako aj ďalšie parametre, medzi ktoré patrí aj vonkajšia teplota.

Zo zadaných parametrov následne model určí priebeh teploty v kabíne automobilu.

Výsledný model bolo potrebné vytvoriť tak, aby ho bolo možné implementovať do mikrokontroléru a pripraviť potrebné rozhranie k HIL simulácii.

## 2 MODELOVANIE TEPELNÝCH SYSTÉMOV

Pri modelovaní tepelných systémov je potrebné vychádzať zo zákonov termomechaniky zaoberajúcou sa zmenou tepelných vlastností látok. Jedná sa o prívod, odvod a zdieľanie tepla [1].

### 2.1 Teplo

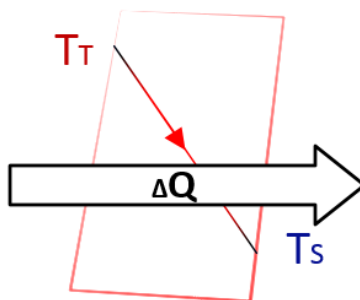
Teplo, označované ako  $Q$ , je prenesená energia vymenená medzi systémom a jeho okolím ako dôsledok ich vzájomného teplotného rozdielu medzi nimi [2].

Nakoľko sa jedná o energiu, tak je jednotkou tepla Joule.

Táto energia je prenášaná v prípade rozdielnych teplôt a to dovtedy, pokiaľ sa nevyrovnajú teploty systému s jeho okolím, kedy nastane tepelná rovnováha.

Množstvo tepla  $Q$  [ J ] je možné vypočítať podľa nasledujúceho vzorca:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot (T_T - T_S) \quad (2.1)$$



Obr. 1: Prenos tepla v rovinnej stene

### 2.2 Merná tepelná kapacita

Je to konštanta úmernosti medzi množstvom tepla dodaného predmetu a tým spôsobenú zmenu jeho teploty vzhľadom na jednotku hmotnosti daného materiálu. Hodnoty mernej tepelnej kapacity látok sa stanovujú za stáleho atmosférického tlaku, tieto hodnoty sú taktiež teplotne závislé [2].

Jednotlivé hodnoty mernej tepelnej kapacity materiálov použitých v modeli sa nachádzajú v tabuľke Tab. 2 na konci kapitoly spolu s ostatnými tepelnými vlastnosťami.

### 2.3 Mechanizmy prenosu tepla

Prenos tepla medzi systémom a jeho okolím prebieha podľa zákonov termodynamiky, z ktorých vyplýva, že teplo môže samovoľne prechádzať iba z látky s vyššou teplotou na látku s nižšou teplotou a nie naopak.

Existujú tri spôsoby, akými sa prenáša teplo medzi systémom a jeho okolím, a to sú prenos tepla vedením, prúdením a žiarením. Zvyčajne dochádza k viacerým spôsobom prenosu tepla súčasne [1].

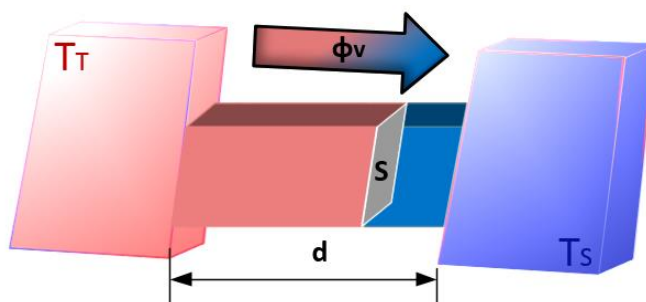
### 2.3.1 Prenos tepla vedením

Týmto spôsobom prenosu tepla, nazývaným aj ako tepelná kondukcia, sa teplo prenáša dotykom telies. Princíp spočíva v prenose tepla z telesa z vyššou teplotou na teleso s nižšou teplotou zvýšením amplitúd kmitania atómov v ploche ich vzájomného dotyku. Nárast amplitúd kmitania atómov sa šíri pozdĺž celého telesa, čím teleso s vyššou teplotou odovzdáva svoju energiu telesu s nižšou teplotou, až kým sa nevyrovnajú teploty oboch telies.

Tento spôsob prenosu tepla je možné určiť ako tepelný tok, ktorý predstavuje výkon prenesený pri prechode tepla daným telesom.

Hodnotu tepelného toku, označovaného ako  $\phi_V$  [ W ] je možné vypočítať podľa nasledujúceho vzorca:

$$\phi_V = \frac{\lambda \cdot S}{d} \cdot (\Delta T) = \frac{\lambda \cdot S}{d} \cdot (T_T - T_S) \quad (2.2)$$



Obr. 2: Prenos tepla vedením

#### 2.3.1.1 Súčiniteľ tepelnej vodivosti

Je to konštanta charakterizujúca materiál, z ktorého je teleso zložené. Jedná sa o mierne teplotne závislý parameter. Čím väčšia je hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti, tým je daný materiál lepší tepelný vodič [2]. Jednotlivé hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti materiálov použitých v modeli sa nachádzajú v tabuľke Tab. 2 spolu s ostatnými zistenými tepelnými vlastnosťami.

### 2.3.2 Prenos tepla prúdením

Tento druh prenosu tepla, nazývaný aj ako tepelná konvekcia nastáva v plynných alebo aj kvapalných látkach, kedy sa teplo zdieľa pohybom makroskopických častíc [1].

V prípade nami vytváraného modelu bude plynnou látkou vzduch. K prenosu tepla prúdením môže dôjsť okrem prirodzeného spôsobu aj nútene.

### 2.3.2.1 Nútená konvekcia

Vo vzduchu je spôsobovaná vplyvom vetra [5]. Taktiež je vytváraná pomocou ventilátorov a klimatizácie, ktoré môžu vytvárať laminárne alebo turbulentné prúdenie vzduchu, ktoré je možné opísať pomocou Reynoldsovho čísla. Prúdením vzduchu vo vetre vzniká turbulentné prúdenie [14]. Reynoldsove číslo v prípade turbulentného prúdenia dosahuje hodnôt  $Re > 3450$ . Presné hodnoty Reynoldsovho čísla je možné spočítať pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$Re = \frac{r \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (2.3)$$

V blízkosti stien materiálu je vplyv turbulentného prúdenia opisovaného Reynoldsovým číslom slabší [16]. Táto relatívna hrúbka tepelných hraničných vrstiev je opisovaná Prandtlovým číslom [15], ktoré je možné vypočítať podľa vzťahu:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad (2.4)$$

Pre zistenie veľkosti súčiniteľa prestupu tepla pri nútenej konvekcii je potrebné vypočítať Nusseltovu koreláciu pre nútenú konvekciu v turbulentnom prúdení [17]:

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{4}}}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (2.5)$$

Z Nusseltovho čísla je následne možné spočítať výsledný súčiniteľ nútenej konvekcie:

$$\alpha_n = \frac{Nu_{turb} \cdot \lambda}{r} \quad (2.6)$$

### 2.3.2.2 Prirodzená konvekcia

V prípade vzduchu je spôsobovaná rozdielom jeho hustoty alebo teploty, ktorá nastane ak je vzduch v styku s predmetom s vyššou teplotou. Teplota vzduchu v takom prípade rastie a zvyšuje sa jeho objem a zároveň klesá jeho hustota, čím sa stáva ľahší, než okolitý studenší vzduch. Vplyvom vztlaku začne teplejší vzduch



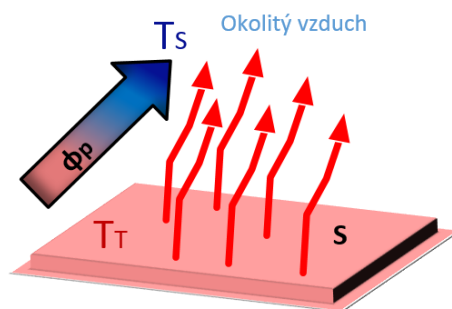
stúpať a chladnejší vzduch klesne na jeho pôvodné miesto a tento proces sa opakuje až do vyrovnaní ich teplôt. [15]

### 2.3.2.3 Súčiniteľ prestupu tepla

K presnejšiemu zisteniu teploty povrchu materiálu je potrebné analyzovať niektoré vlastnosti pohybu vzduchu v blízkosti povrchu daného materiálu [3], pretože v blízkosti povrchu materiálu je tenká vrstva, ktorou sa teplo prenáša v podstate vedením. Určiť hrúbku tejto vrstvy je náročné, nakoľko nie je vlastnosťou vzduchu ale závisí od mnohých faktorov. Jedná sa o Reynoldsove číslo, štruktúru povrchu steny materiálu, tlakového gradientu a Machovho čísla [5]. Tieto vlastnosti do seba zahŕňa súčiniteľ prestupu tepla  $\alpha$ , ktorý je možné určiť pomocou experimentálneho merania. Je ho taktiež možné stanoviť aj z empirických vzťahov alebo pomocou bezrozmerných podobnostných čísel [1].

Výslednú hodnotu tepelného toku, označovaného ako  $\phi_P$  [ W ] je možné vypočítať podľa nasledujúceho vzorca:

$$\phi_P = \alpha \cdot S \cdot (\Delta T) = \alpha \cdot S \cdot (T_T - T_S) \quad (2.7)$$



Obr. 3: Prenos tepla prúdením

Jednotlivé hodnoty súčiniteľa prestupu tepla materiálov používaných v modeli sa nachádzajú zadané, ako parameter v skripte.

### 2.3.3 Prenos tepla žiarením

Prenos tepla medzi predmetom a jeho okolím je vykonávaný prostredníctvom elektromagnetických vln, ku ktorým patrí aj viditeľné svetlo [2].

Pri premene žiarivého toku na tepelný tok sa pri dopade na iný predmet jedná o tepelné žiarenie. Druhy žiarení sa rozlišujú podľa vlnových dĺžok. Tepelné žiarenie zahŕňa vlnové dĺžky v rozsahu od 100 nm do 0,1 mm [6]. Táto oblasť vlnových dĺžok obsahuje ultrafialové žiarenie a z väčšej svojej časti infračervené žiarenie.

Každý predmet s teplotou vyššou než 0 K vykonáva prenos tepla žiarením, nazývanom aj sálaním, na ktoré nie je potrebné hmotné prostredie [2]. Tepelný tok, vyžarovaný prostredníctvom elektromagnetického žiarenia označovaného ako  $\phi_z$  [ W ] je možné určiť pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\phi_z = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_T^4 - T_S^4) \quad (2.8)$$

### 2.3.3.1 Emisivita povrchu predmetu

Emisivita je parameter popisujúci schopnosť telesa vyžarovať alebo pohlcovať teplo. Môže nadobúdať hodnoty v rozsahu od 0 do 1 [2]. Jej hodnota je závislá na vlnovej dĺžke žiarenia a samotného zloženia a prevedenia predmetu, ako aj teplote jeho povrchu a smere samotného žiarenia.

Pri dopade žiarivého toku na povrch materiálu môže dôjsť okrem pohltienia žiarivého toku materiálom a jeho premene na tepelný tok aj k jeho odrazu alebo k prechodu.

Teleso, ktorého hodnota emisivity je rovná 1 sa nazýva čierne teleso. Pojem čierne teleso predstavuje teleso schopné absorbovať všetko tepelné žiarenie dopadajúce na jeho povrch, ako aj teleso schopné dokonale vyžarovať žiarenie.

Jedná sa však iba o teoretický model využívaný ako referencia [7].

V prípade, že je hodnota emisivity rovná 0, jedná sa o takzvané biele teleso, ktoré naopak všetko dopadajúce žiarenie odrazí.

Tepelnú rovnováhu dosiahne teleso vtedy, keď sa jeho emisivita, nazývaná aj ako pomerná žiarivosť, vyrovná pomernej pohltivosti nazývanej absorptancia, ktorá opisuje schopnosť absorbovať teplo. Jedná sa teda o prípad, kedy teleso vyžiari rovnakú energiu, akú absorbuje [6].

Telesá, ktorých emisivity sú nezávislé na vlnovej dĺžke sa nazývajú šedé telesá. Pojem šedé teleso je ale rovnako, ako aj čierne a biele teleso teoretickým modelom [8].

Jednotlivé hodnoty emisivity povrchu materiálov používaných v modeli sa nachádzajú v tabuľke Tab. 1:

Tab. 1: Emisivita povrchu materiálov pri  $T \sim 300K$

Látka	$\varepsilon$ [ - ]
Hliník	0,09
Sklo	0,9

## 2.4 Dynamika tepelných procesov

K riešeniam problémov dynamiky prenosu tepla sa pristupuje za predpokladu zjednodušovania, ktoré umožnia pracovať s modelmi obsahujúcimi sústredené parametre, ktoré sú premenné iba v čase a sú nezávislé na polohe v priestore.

Použitím zjednodušenia je myslené používanie priemerných teplôt a ich rovnomerné rozloženie v materiáloch.

Rýchlosť zmeny teploty materiálu je úmerná celkovému množstvu tepla privedenému do daného materiálu za jednotku času [1].

Zmenu teploty materiálu je možné určiť pomocou nasledujúceho vzťahu v tvare nelineárnej diferenciálnej rovnice:

$$c \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = \phi_V + \phi_P + \phi_Z \quad (2.9)$$

## 2.5 Zdroje tepla v systéme

Teoreticky je každý predmet s teplotou vyššou ako 0 K zdrojom tepla. V tejto časti budú ale opisované tie, ktoré majú najväčší vplyv na zmenu teploty v kabíne automobilu.

### 2.5.1 Slnko

Slnko je z pohľadu fyziky skoro dokonalým čiernym telesom [6].

Zo svojho povrchu vyžaruje výkon približne  $3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Z vyžiareného výkonu dopadne k Zemi už ale iba  $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a do Zemskej atmosféry prejde približne štvrtina tohto výkonu, čo je  $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Hodnotu absorbovanú Zemským povrchom ale ovplyvňujú podmienky v samotnej Zemskej atmosfére, kde najväčší vplyv má oblačnosť, ktorá výslednú hodnotu dopadajúceho žiarenia na povrch Zeme značne znižuje. Odrazením tohto žiarenia od atmosféry, oblakov, aerosólu a samotného Zemského povrchu, ako aj vplyvom absorpcie oblakov a atmosféry sa môže táto hodnota, ktorú absorbuje samotný Zemský povrch počas dňa znížiť až na približne  $168 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  [11]. Hodnotu absorbovanú Zemským povrchom taktiež ovplyvňuje uhol, pod ktorým slnečné žiarenie dopadá. Počas letných mesiacov žiarenie dopadá pod ostrým uhlom, vďaka čomu zahrieva Zemský povrch viac ako je tomu v zimných mesiacoch, kedy lúče dopadajú pod tupým uhlom [21].

#### 2.5.1.1 Skleníkový efekt

Vzniká v uzavretom priestore za sklom ožarovaným Slnkom. Sklo umožňuje prechod slnečného žiarenia a bráni prechodu žiarenia objektov v uzavretom

priestore, ktorý predstavuje aj kabína automobilu, v ktorej tak dochádza k výraznému zvyšovaniu teploty vzduchu. Skleníkový efekt môže taktiež vzniknúť vplyvom skleníkových plynov obsiahnutých v atmosfére [6].

## **2.5.2 Človek**

Ľudské telo je nepretržitým zdrojom tepla, ktoré získava zo svojho metabolizmu [9]. Vnútna telesná teplota človeka je za normálnych podmienok v rozsahu od 36,6 do 37,1 °C a priemerná teplota kože je v rozsahu od 32,5 do 35 °C [10].

Tepelný výkon produkovaný človekom do okolia je závislý od jeho prevádzanej činnosti. V prípade sedenia, čo je zvyčajná činnosť v automobile, je tepelný výkon priemerného človeka s hmotnosťou 73,5 kg a telesnou plochou 1,9 m<sup>2</sup> približne 87 W [10]. Výsledná hodnota je ale závislá aj od toho, ako je človek oblečený. Vďaka oblečeniu je možné znížiť tepelné straty človeka až o polovicu [9].

## **2.5.3 Klimatizácia**

Cez prieduchy ventilácie je možné pomocou klimatizácie dodávať dovnútra kabíny prefiltrovaný vonkajší vzduch, ktorý je možné zahriať alebo schladiť na požadovanú teplotu.

### **2.5.3.1 Hmotnostný prietok**

Jeden z možných spôsobov, akým by bolo možné nasimulovať funkciu klimatizácie v aute, je hmotnostný prietok vzduchu. Do kabíny auta prechádza vonkajší vzduch klimatizačným systémom cez prieduchy ventilácie.

Jedná sa o prietok vzduchu nazývaný hmotnostný prietok [22].

Veľkosť hmotnostného prietoku je možné určiť pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot S \quad (2.10)$$

## **2.6 Vzduch**

Jedná sa o zmes viacerých plynov obsiahnutých v Zemskej atmosfére. Najviac je obsiahnutý dusík, kyslík, oxid uhličitý a rôzne vzácne plyny [12].

Fyzikálne vlastnosti vzduchu, ako sú jeho hustota alebo merná tepelná kapacita sú závislé od teploty.

### **2.6.1 Suchý a vlhký vzduch**

Zloženie vzduchu okrem spomínaných plynov môže obsahovať aj vodnú paru.

V takom prípade sa vzduch špecifikuje ako vlhký vzduch, v opačnom prípade sa

nazýva suchý vzduch. Suchý vzduch, nakoľko neobsahuje vodnú paru je ľahší a má nižšiu hustotu, ktorej hodnota sa dá vypočítať nasledujúcim spôsobom:

$$\rho_V = \frac{p_V \cdot M_A}{R \cdot T} \quad (2.11)$$

### 2.6.1.1 Vlhký vzduch

V prípade vlhkého vzduchu je potrebné pre zistenie celkovej hustoty vzduchu započítavať aj obsiahnutú vodnú paru, ktorej hustota závisí od tlaku vzduchu. Na základe trojného bodu vody spočítame rovnovážny bod tlaku vodných pár:

$$p_{v*} = p_0 \cdot e^{\left[ \frac{h_{fg}}{R_M} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (2.12)$$

Následne je potrebné určiť čiastočný tlak vodnej pary vo vzduchu, ktorý sa určí podľa nasledujúceho vzťahu:

$$p_V = \frac{\varphi}{100} \cdot p_{v*} \quad (2.13)$$

Merná vlhkosť vzduchu predstavujúca obsah vlhkosti vo vzduchu je určená vzťahom:

$$x = \frac{M_V}{M_A} \cdot \frac{p}{p - p_V} \quad (2.14)$$

Podľa zákona ideálneho plynu je hustota suchej časti vzduchu vo vlhkom vzduchu [12] :

$$\rho_{DA} = \frac{(p - p_V) \cdot M_A}{R \cdot T} \quad (2.15)$$

Hustota vodnej pary je určená nasledujúcim výpočtom:

$$\rho_{VP} = x \cdot \rho_{DA} \quad (2.16)$$

Celková hustota vlhkého vzduchu vznikne súčtom čiastkových hustôt:

$$\rho_{celk} = \rho_{DA} + \rho_{VP} \quad (2.17)$$

## 2.7 Spôsoby riešenia simulácie

Riešenie simulácie fyzikálnych modelov je možné vykonávať vo viacerých návrhových prostrediach. Sú nimi napríklad Dymola a Open Modelica alebo Simscape, ktorý je súčasťou Matlab-Simulink a slúži priamo pre modelovanie fyzikálnych systémov pomocou predprogramovaných blokov. V prípade požiadavky vytvorenia modelu pomocou diferenciálnych rovníc je najvhodnejšie využiť Matlab-Simulink, ktorý okrem iného podporuje aj generovanie kódu pre HIL simuláciu.

### 2.7.1 Matlab-Simulink

Matlab je programovacie prostredie umožňujúce analýzu a začleňovanie rôznych algoritmov do Simulinku, v ktorom sa pomocou blokových diagramov vytvárajú simulačné modely [20].

#### 2.7.1.1 Výber Solveru v Simulinku

Solver používa numerické metódy, pomocou ktorých je možné vyriešiť vytvorený matematický model.

V konfiguračných nastaveniach Solveru je pre model možné nastaviť variabilný a pevný krok simulácie [13]. V prípade využitia modelu pre HIL simuláciu s mikrokontrolérom je potrebné použiť pevný krok simulácie nazývaný aj ako Fixed-Step Solver. Z knižnice Solverov je možné vybrať konkrétny typ pre diskretný a spojitý model. Ak je požadovaná simulácia pre spojitý model, tak je možné použiť pre simuláciu Solvpre, ktoré je možné v podstate rozdeliť na 2 kategórie, a to explicitné a implicitné.

K explicitným Solverom patria metódy ode1, ode2, ode3, ode4, ode5, ode8.

V prípade implicitných metód je Simulinku možné využiť len jednu metódu ode14x. Pri modelovaní diferenciálnych rovníc, ktorých výsledok sa prudko mení alebo osciluje, je potrebné použiť ku správne riešeniu implicitný systém s malým krokom riešenia. Ode14x je numerická metóda, ktorá generuje Jacobiánovu maticu a rieši sústavu algebraických rovníc pomocou Newtonových alebo Jacobiánových metód [13].

Pre modelovanie fyzikálnych systémov, u ktorých dochádza k malým zmenám vo výsledkoch pri výpočte je možné použiť explicitné metódy, ktoré sú výpočtovo menej náročnejšie a ich simulácia teda trvá kratší čas v porovnaní s implicitnou metódou ode14x, môžu však viesť v prípade rýchlo sa meniacich výsledkov ku zlému riešeniu [13]. V modeli s diskretným časom bude použitý diskretný solver. Z tohto modelu bude následne vygenerovaný kód v jazyku C pre implementáciu do mikrokontroléru pre HIL simuláciu.

### **2.7.2 HIL Simulácia**

HIL simulácia je druh simulácie vykonávanej v reálnom čase, pomocou ktorej je možné testovať vytvorený model na základe reálnych podnetov, ako aj na testovanie správnosti fyzického modelu. Jedná sa o súbežnú simuláciu reálneho modelu, ako aj virtuálneho modelu vytvoreného v počítači, ktorý je realizovaný vo vývojovom hardvéry obsahujúci aj rozhranie pre ovládanie vstupov modelu [18]. Ak je použitý mikrokontrolér ako vývojový hardvér pre HIL simuláciu, tak je potrebné z vytvoreného modelu vygenerovať kód v jazyku C, ktorý je možné do mikrokontroléru naprogramovať.

Pre vygenerovanie kódu v jazyku C slúži v Simulinku Simulink Coder [19].

Vytvorený model má slúžiť pre overovanie riadiacich algoritmov v HIL simulácii.

Riadiaca jednotka bude ovládať akčné prvky klimatizácie a model kabíny v mikrokontroléry bude na základe vstupných hodnôt, akými budú teplota a prietok vzduchu z klimatizácie simulovať správanie kabíny automobilu.

Výstupom z modelu bude teplota vzduchu v kabíne, ktorá bude snímaná pomocou riadiacej jednotky.

### 2.7.3 Opis kabíny a niektorých materiálov používaných pri jej výrobe



Obr. 4: Modelovaný automobil

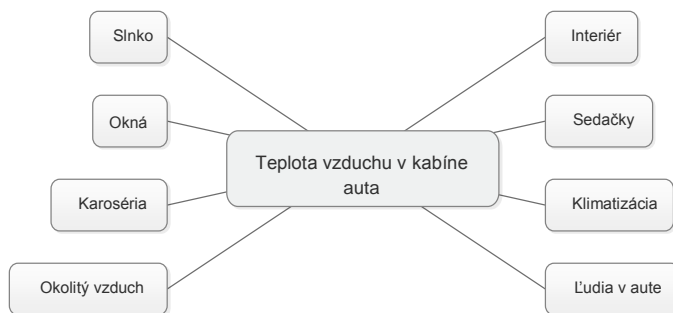
Tab. 2: Niektoré materiály a ich vlastnosti použité pre jednotlivé časti kabíny auta

Materiál	$\lambda$	$c$	$\rho$
	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	$[kg \cdot m^{-3}]$
KAROSÉRIA [24, 25, 25, 26, 27]			
ASTM A525 Galvanized Steel	52	470	7800
Steel (0,5% C)	54	465	7833
Al, Duralumin (4% Cu 0,5% Mg)	164	883	2787
Aluminum 3105-H12	171	897	2720
SAE-AISI 1008 Steel	59	470	7872
INTERIÉR [25, 28, 28, 29]			
Polypropylene	0,15	1880	880
ABS	0,25	1300	1010
Polyvinylchloride	0,17	1000	1300
Novodur P3H-AT	0,129	1800	1050
SEDAČKY[30, 31, 25, 28, 32]			
Leather	0,36	1500	860
Nylon	0,36	1600	1169
Polyester	0,2	1115	1345
Polychloroprene	0,12	1300	1200
Aluminium 6101-T6	218	895	2700
OSTATNÉ ČASTI [33, 4]			
Tempered Monolithic Glass	0,8	800	2500
Suchý vzduch pri $T \sim 293,15K$	0,0257	1005	1,205



### 3 TVORBA TEPELNÉHO MODELU KABÍNY AUTOMOBILU

Po zosumarizovaní fyzikálnych princípov v modelovaní fyzikálnych systémov bolo potrebné určiť jednotlivé vplyvy a časti automobilu vplývajúce na teplotu vzduchu vo vnútri jeho kabíny. Tieto časti sú zobrazené na obrázku Obr. 5.



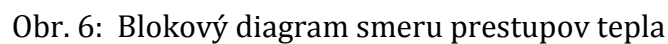
Obr. 5: Časti vplývajúce na teplotu vzduchu v kabíne automobilu

Základom pre riešenie zadaného modelu sú diferenciálne rovnice popisujúce teplotné rozdiely jednotlivých častí kabíny. Najskôr bolo potrebné určiť smery prestupu tepla pre správne vytvorenie diferenciálnych rovníc. K tomuto účelu pre lepšie znázornenie jednotlivých tepelných tokov bol vytvorený blokový diagram znázornený na obrázku Obr. 6.

Na základe blokového diagramu ( Obr. 6 ) sme vytvorili jednotlivé diferenciálne rovnice, ktoré sa stali základom riešenia pre namodelovanie systému v programe Matlab – Simulink. Jednotlivé rovnice sa nachádzajú v prílohe. Dané diferenciálne rovnice sme taktiež prepísali do maticového tvaru, kde sme vyčíslili jednotlivé parametre pre lepšie znázornenie ich vplyvu na dynamiku celého systému. Tieto matice sa taktiež nachádzajú v prílohe.

Najskôr bol v Simulinku vytvorený model kabíny so spojitým časom, ktorý bol podrobne opísaný v predchádzajúcej Semestrálnej práci.

V nasledujúcich častiach tejto bakalárskej práce bude opísaný už iba diskretný model vhodný pre generovanie kódu v jazyku C do mikrokontroléru a jeho prípadné porovnanie so spojitou verziou modelu.



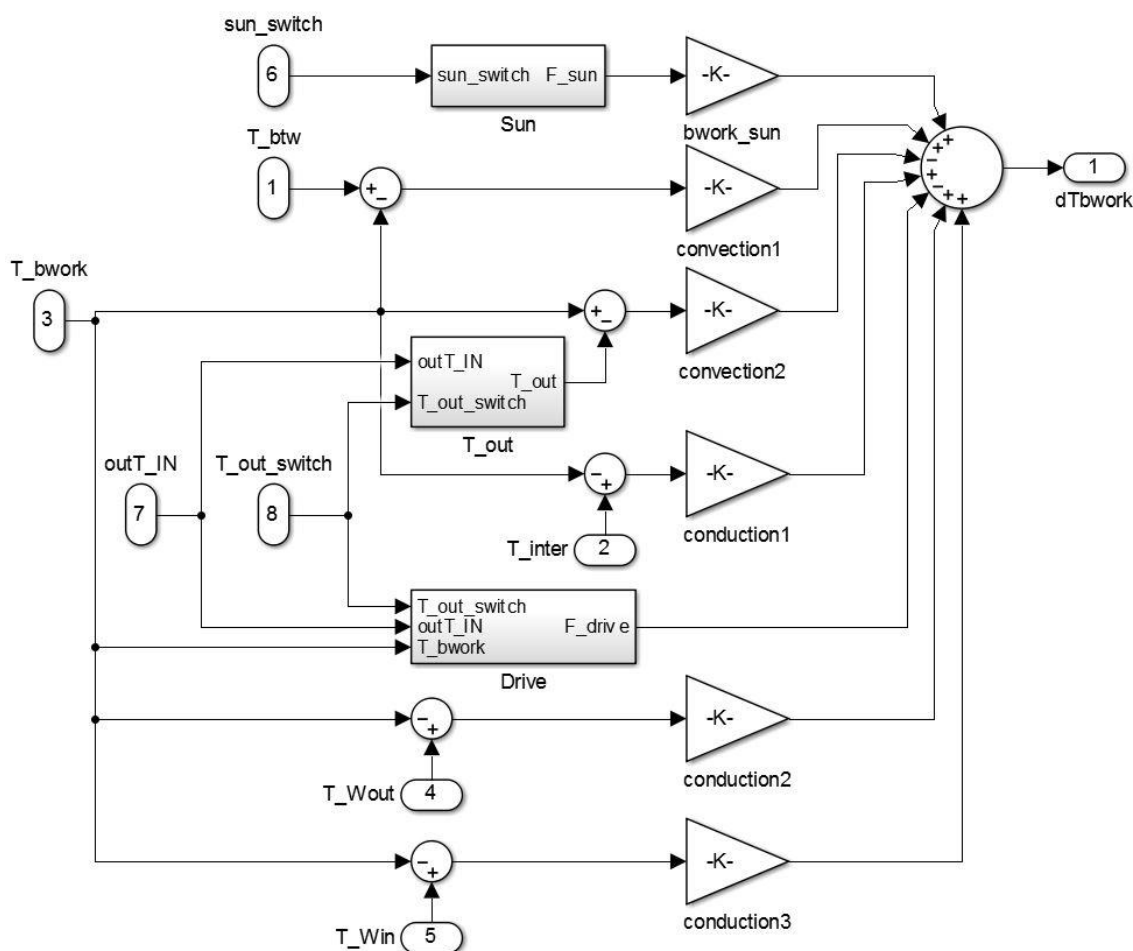
Pre vytvorenie modelu bolo použitých niekoľko zjednodušení. Jedným z nich bolo zjednodušenie modelovania pomocou nezapočítavania všetkých častí automobilu. Nebrali sme do úvahy motor auta, ktorý je od samotnej kabíny veľmi dobre tepelne izolovaný, rovnako ako aj kolesá auta alebo jednotlivé mechanické časti akými sú prevodovka alebo výfuková sústava. Ďalším zjednodušením bolo, že jednotlivé časti automobilu sme započítavali ako homogénny materiál, ktorý má rovnakú teplotu v celom svojom objeme, čo bude bližšie opísané pre každú časť kabíny v nasledujúcich častiach. Použitý model kabíny auta predpokladá klasický 5 miestny automobil s uzavretou strechou.

Konštrukcia karosérie sa rozdeľuje na viacero častí, ktoré sa vyrábajú z rôznych materiálov a s rôznou hrúbkou, v závislosti na konkrétnom modeli automobilu.

Najčastejšie používanými materiálmi sú ale kovové materiály ako rôzne druhy ocelí tvoriace 80 až 90 % konštrukcie u bežných áut strednej triedy. Ďalej sú využívané hliníkové a horčíkové zliatiny, ktoré sú využívané aj na výrobu celých karosérii. [23]

Karoséria bola v modeli vytvorená ako jeden blok, ktorého parametre boli zvolené na základe spriemerovania jednotlivých materiálov využívaných pri jej výrobe, z ktorých sú niektoré v tabuľke Tab. 2, podľa ktorej vyplýva, že sme predpokladali celokovovú karosériu.

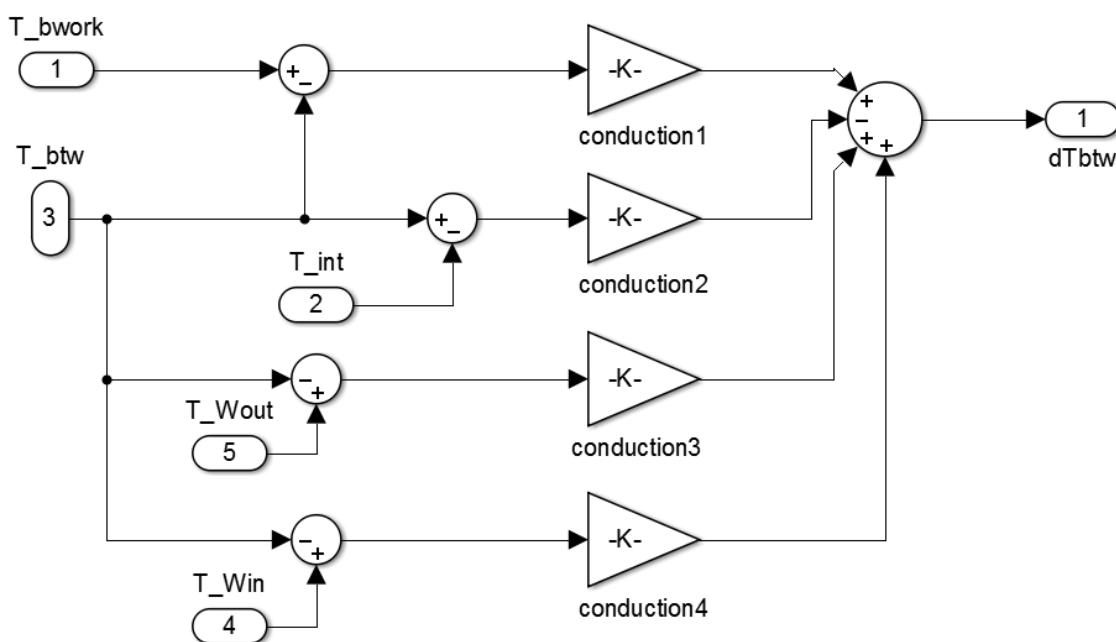
Okolitý vzduch vplýva na teplotu karosérie vplyvom vetra alebo počas jazdy najčastejšie pomocou nútenej konvekcie, kde okolitý vietor vytvára turbulentné prúdenie vzduchu. Na karosériu auta je taktiež možné v modeli pôsobiť pomocou Slniečného žiarenia, ktorého hodnotu je možné zadávať priamo z inicializačného skriptu. V modeli zanedbávame emisivitu rôznych farieb povrchu automobilu, miesto toho je v modeli pridaná možnosť absorpcie dopadajúceho žiarenia na karosériu.



Obr. 7: Modelový subsystém karosérie

### 3.1.2 Časť medzi karosériou a interiérom

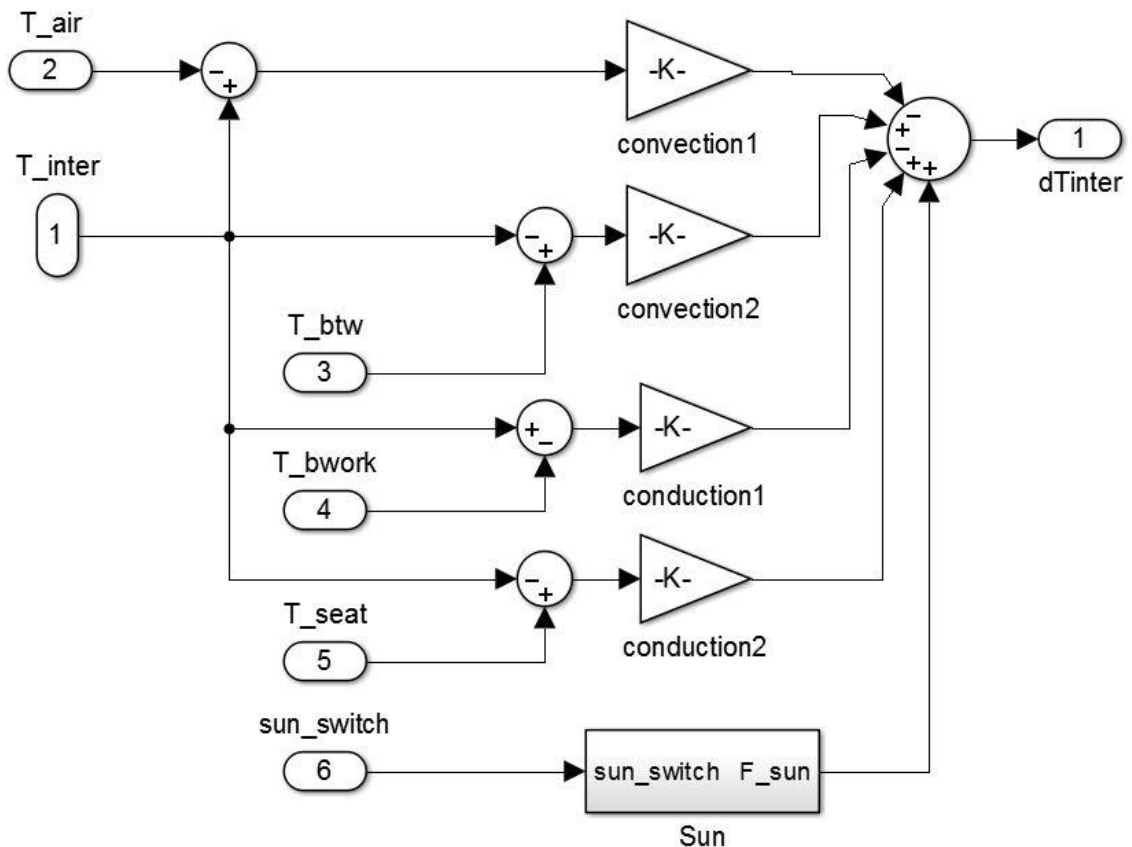
Karoséria s interiérom nie sú v automobile spojené celými svojimi časťami. Majú medzi sebou priestor, ktorý obsahuje rôzne druhy materiálov vytvarované tak, že napríklad vnútro dverí auta obsahuje rôzne medzery vzduchu alebo tadiaľ vedie elektroinštalácia vozidla. Z tohto dôvodu sme umiestnili medzi karosériu a interiér ďalšiu vrstvu, v ktorej sme vytvorili zjednodušenú možnosť výmeny tepla iba vplyvom kondukcie, ako znázorňuje nasledujúci obrázok Obr. 8.



Obr. 8: Modelový subsystém časti medzi interiérom a karosériou

### 3.1.3 Interiér

V kabíne automobilu je interiér zložený z viacerých druhov materiálov s rozličnými tepelnými vlastnosťami. Do parametrov interiéru sme v modeli zahrnuli všetky časti obklopujúce dvere z vnútra kabíny auta, plastové krytky, prístrojovú a palubnú dosku ako aj strešnú časť kabíny. Jednalo sa v podstate o rôzne druhy plastov. Ako je možné vidieť zo znázornenia prestupov tepla, podľa ktorých sme vychádzali pri tvorbe diferenciálnych rovníc na obrázku Obr. 6, tak na teplotu samotného interiéru vplyva vzduch vo vnútri kabíny auta s vrstvou nachádzajúcou sa medzi interiérom a karosériou a aj samotná karoséria, ktorá sa malou časťou spája s interiérom, ako aj časť sedačiek, nakoľko sa určitá časť zadných sedačiek dotýka v aute aj interiéru. V modeli je taktiež možnosť nechať na interiér pôsobiť Slnko ako zdroj tepla.



Obr. 9: Modelový subsystém interiéru

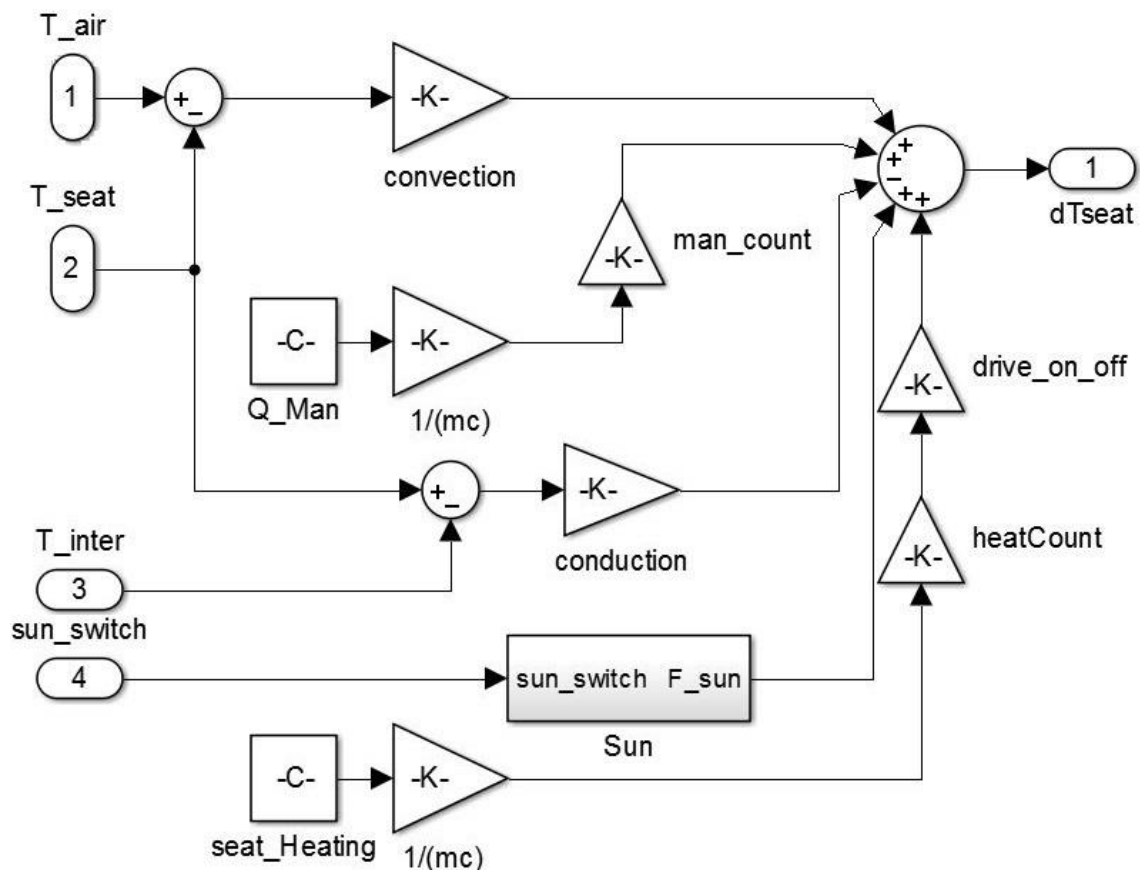
### 3.1.4 Sedačky

Pri vytváraní časti modelu sedačiek v Simulinku sme brali do úvahy ich spojenie s interiérom, nebrali sme však do úvahy ich prípadné spojenie s karosériou, kde by mohlo dochádzať k ich priamej výmene tepla vplyvom kondukcie.

Taktiež bola v Simulinku vytvorená možnosť použitia elektronického vyhrievania sedačiek. Pri použití tejto možnosti je možné vybrať počet vyhrievaných sedačiek, ako aj tepelný výkon vyhrievania.

Na vplyv teploty sedačiek sme započítavali vplyv okolitého vzduchu a prípadných ľudí, ktorý by na nich sedeli. Taktiež je možné na sedačky pôsobiť Slnkom ako zdrojom tepla.

Materiálové zloženie sedačiek je rozličné u každého modelu automobilu. Z tohto dôvodu sme použili približne spriemerovanú hodnotu z niektorých používaných materiálov, do ktorých sme započítali aj kovovú konštrukciu sedačiek.



Obr. 10: Modelový subsystém sedačiek

### 3.1.5 Okná

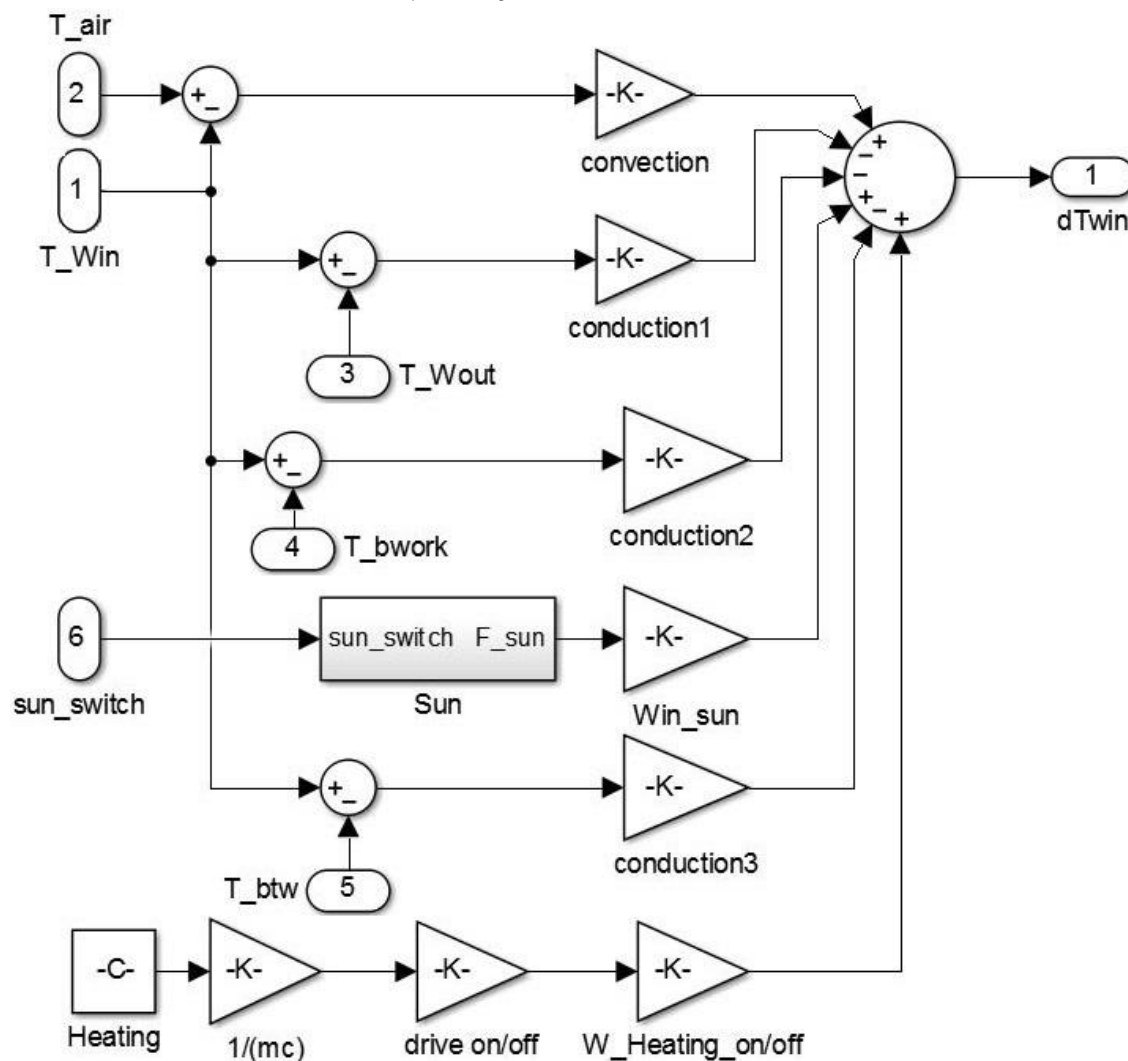
Okná vďaka tomu, že prepúšťajú slnečné žiarenie spôsobujú vo vnútri kabíny automobilu takzvaný skleníkový efekt, čím pri dopadajúcom slnečnom žiarení výrazne zvyšujú teplotu v kabíne auta. Nakoľko majú okná z jednej svojej strany vnútorný vzduch kabíny auta a z vonkajšej strany okna okolitý vzduch, rozhodli sme sa rozdeliť okná na dve časti, a to vonkajšiu a vnútornú, nakoľko bol predpoklad výraznejšieho rozdielu teplôt ich povrchu.

Z rozmerov okien sme spočítali ich celkovú plochu, ako aj objem. Spočítané hodnoty sme rozdelili na polovicu a zadali ako parametre pre každú z častí okna. Najčastejšie sa pre okná v automobiloch používajú špeciálne bezpečnostné tvrdené sklá alebo temperované monolitické sklá, ktorých parametre sme vložili do tabuľky Tab. 2. Hrúbku okien sme zvolili 4 mm, čo je hodnota, ktorú sme odmerali ako hrúbku okna vo dverách. Pri výpočte sme započítavali všetky sklá na automobile, teda čelné sklo, zadné sklo ako aj okná vo dverách, rovnako aj pri prechode slnečného žiarenia, nakoľko sa jedná o priesvitnú časť automobilu cez ktoré by malo žiarenie prechádzať so zanedbateľnými rozdielmi sme započítavali celú plochu. Celkovú plochu okien sme započítavali aj pri možnosti jazdy s automobilom, kedy na vonkajšiu stranu okien pôsobí nútená konvekcia

s okolitým vzduchom. Predpokladali sme automobil bez strešného okna. V modeli bola taktiež použitá možnosť vyhrievania zadného okna.

### 3.1.5.1 Okná z vnútornej strany kabíny

Ako je možné určiť z obrázku Obr. 11, na okná z vnútornej strany kabíny pôsobia viaceré mechanizmy prenosu tepla, a to konkrétne prenosy tepla vedením označený ako conduction a prenosy tepla prúdením, ktorý je označený ako convection. Daný prenos tepla vedením prebieha medzi oboma časťami okna, karosériou, ktorej sa bočné okná dotýkajú svojou vrchnou časťou. Spodná časť okien je uchytená v priestore medzi karosériou a interiérom, preto sa vykonáva prenos tepla taktiež medzi týmito časťami pomocou bloku označenom conduction3. Prenos tepla prúdením sa vykonáva medzi vzduchom v kabíne auta a stenou okien z ich vnútornej strany v kabíne.

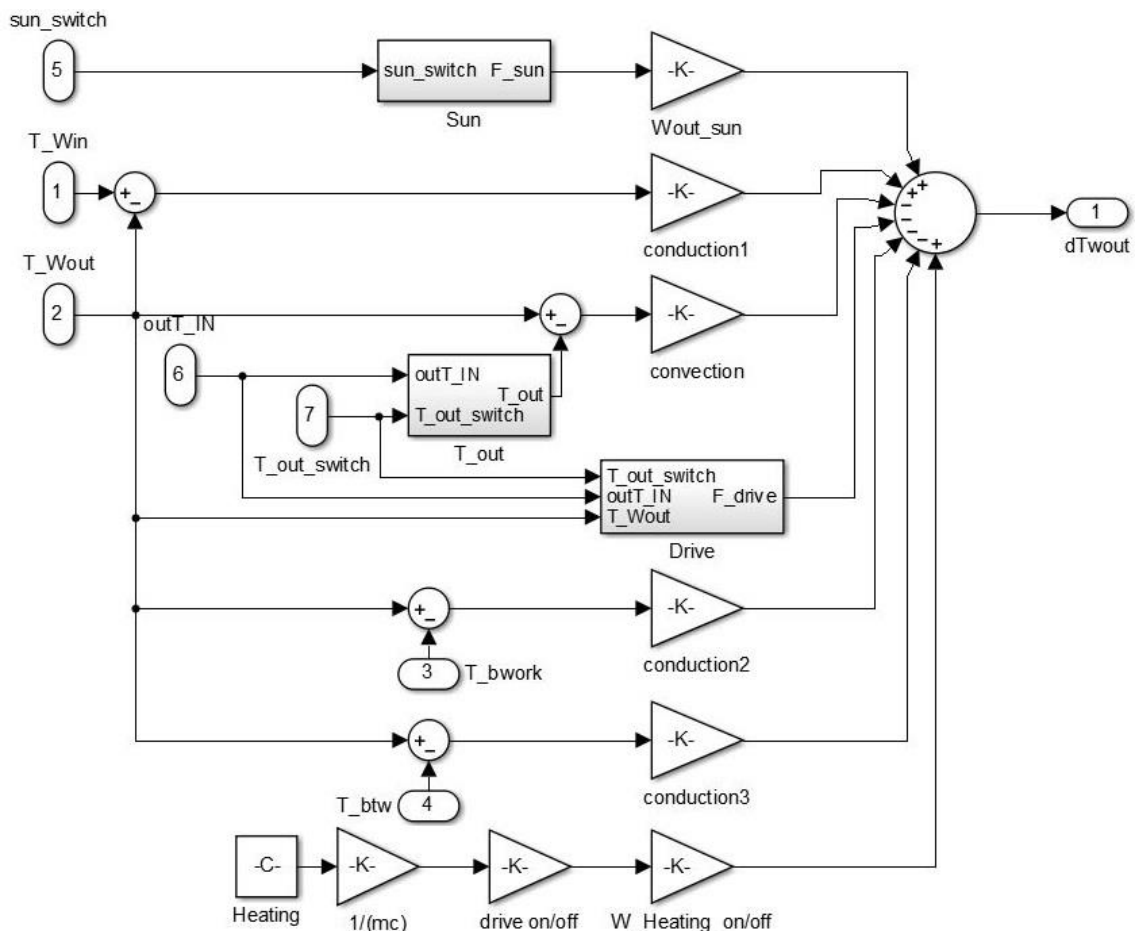


Obr. 11: Modelový subsystém časti okien z vnútornej strany

### 3.1.5.2 Okná z vonkajšej strany kabíny

Na vonkajšiu časť okien je v modeli napevno stanovené pôsobenie konvekcie medzi vonkajším vzduchom s povrchom okna a kondukcie medzi časťami okna. Vonkajší vzduch je vytvorený ako subsystém  $T_{out}$  v ktorom je možné pomocou prepínača ovládaného zo skriptu vyberať, či sa bude vonkajšia teplota meniť, ako je tomu počas dňa alebo sa bude jednať o konštantnú hodnotu. Táto časť modelu obsahuje aj bloky subsystémov Sun a Drive. Jedná sa o teplotné pôsobenie Slnka a jazdy automobilu, ktoré je možné taktiež nechať pôsobiť výberom zo skriptu. Rovnako, ako je tomu u vonkajšej teploty, tak aj pri voľbe pôsobenia Slnka na automobil je možné vybrať konštantnú hodnotu alebo meniace sa hodnoty. Nakoľko sa ale u viacerých automobilov používajú fólie zabraňujúce prechodu svetla dovnútra automobilu, použili sme pre túto možnosť blok  $W_{out\_sun}$ , do ktorého sa zadáva konštantná hodnota, predstavujúci absorpciu tepelného žiarenia okna zadávaná v rozsahu od 0 do 1, čím sme nahradili výpočet absorpcie v závislosti na emisivite materiálu. V prípade bloku Drive predstavujúci prípadnú jazdu automobilom je taktiež využitá možnosť výberu zo skriptu. Jedná sa vlastne o nútenú konvekciu, ktorej súčiniteľ núteného prestupu tepla je určený pomocou turbulentného prúdenia vzduchu vznikajúceho pri jazde automobilu, ale aj pri vetre. Danú hodnotu počítame v skripte a jedná sa o konštantnú hodnotu. Vstupmi celkového subsystému okien z vonkajšej strany, označovaného v modeli ako  $T_{Wout}$  sú vstupné porty 1 ( $T_{Win}$ ) a 2 ( $T_{Wout}$ ), pomocou ktorých sa do subsystému dostávajú termodynamické teploty vnútornej a vonkajšej časti okna. Na výstupe celkového subsystému okien z vonkajšej strany je po sumačnom člene výstupný port 1  $dT_{wout}$ , pomocou ktorého sa do ostatných častí modelu dostane rozdiel tepelného toku časti okien z vonkajšej strany.





Obr. 12: Modelový subsystém časti okien z vonkajšej strany

### 3.1.6 Vzduch v kabíne auta

Teplota vzduchu v kabíne auta je výrazne ovplyvňovaná nielen samotnými súčasťami kabíny alebo klimatizáciou a ľuďmi sediacich v nej, ale aj vplyvom vonkajšieho prostredia. Jedná sa najmä o vplyv slnečného žiarenia spôsobujúce skleníkový efekt. Pri zadávaní počiatočných podmienok vzduchu v skripte modelu je možné okrem počiatočnej teploty, u ktorej je aj možnosť výberu jej zmeny počas simulácie, zvoliť aj možnosť počítania hustoty vzduchu a podľa toho aj ostatné parametre vzduchu. U týchto možností je možné zadávať buď nemenné konštanty alebo počítať napríklad hustotu v závislosti na aktuálnej teplote, či už suchého alebo vlhkého vzduchu. V prípade výpočtu vlhkého vzduchu bolo použité zjednodušenie znamenajúce nezapočítavanie absorpcie vlhkosti jednotlivých materiálov, nakoľko je u väčšiny použitých materiálov veľmi nízka. Taktiež sme v prípade ľudí v kabíne auta nepočítali s možnosťou tvorby oxidu uhličitého pri jeho vydychovaní človekom, ako aj zmenu ostatných parametrov vzduchu spôsobovanou prítomnosťou ľudí, či závislosť vlastností vzduchu na nadmorskej výške.

### **3.1.7 Zdroje tepla v kabíne auta**

Do zdrojov tepla vplývajúcich na teplotu kabíny sme nijako nezapočítavali prípadné teplo z motoru auta, nakoľko predpokladáme jeho dokonalú izoláciu od častí kabíny automobilu.

#### **3.1.7.1 Slnko**

Vplyv Slnka sme do simulácie nechali zadávať pomocou viacerých spôsobov, aby bolo možné simulovať viaceré druhy svetelných podmienok, akými sú deň a noc. V prípade zvoleného dňa je možné meniť tepelný výkon dodávaný na zemský povrch, ktorý je absorbovaný automobilom. Tepelný výkon Slnka absorbuje automobil viacerými svojimi časťami. Pre zjednodušenie výpočtu a nejednoznačnosť možnosti určenia plochy a výkonu slnečného žiarenia dopadajúce na jednotlivé časti sme nechali tepelný výkon Slnka priamo vplývať iba na niektoré z jej častí. A to konkrétne celú plochu započítavanej karosérie ako aj vonkajšej strany okien skrz ktoré slnečné žiarenie dopadá dovnútra kabíny auta kde zohrieva jej jednotlivé časti.

#### **3.1.7.2 Človek**

U človeka bol zvolený spôsob simulácie pomocou tepelného toku, ktorý dodáva do okolia pomocou svojich tepelných strát. Tento tepelný tok je v modeli zadávaný ako konštanta, nakoľko si človek vďaka svojmu metabolizmu udržiava konštantnú teplotu, ako aj vznikajúce tepelné straty. Tieto straty sa ale môžu meniť v závislosti na prevádzkanej činnosti, ktorá ale zvyčajne v automobile býva rovnaká, a to konkrétne sedenie a šoférovanie. Do úvahy sme taktiež brali, že človek zníži svoje tepelné straty oblečením až na polovicu. V modeli sme ale nezapočítavali tvorbu oxidu uhličitého pri vydýchaní ľudí v aute, čo ovplyvňuje vlastnosti vzduchu. Celkový tepelný výkon dodávaný človekom sme rozdelili na 2 polovice, kde jednu časť dodáva do sedačiek a druhú časť odovzdáva do vzduchu v kabíne auta, takže dodáva do každej časti po 22,5 W.

Pridali sme taktiež možnosť výberu počtu ľudí v aute, ktorá sa vykonáva v skripte zadaním počiatočných podmienok simulácie.

#### **3.1.7.3 Klimatizácia**

Klimatizácia bola vytvorená tak, že do vzduchu v kabíne auta dodáva vzduch s nastavenou teplotou a hmotnostným prietokom. Nie je teda modelovaná ako regulátor, ktorý by udržiaval v kabíne predom zadanú teplotu. V takom prípade, ak do kabíny svieti Slnko alebo sa v nej nachádzajú ľudia, čo zvyšuje teplotu vzduchu, tak klimatizácia nedosiahne nami nastavenú teplotu ale sa k nej iba priblíži.

Pre zrealizovanie klimatizácie bol v spojitvej verzii modelu použitý prenos zotrvačného článku prvého rádu s časovou konštantou 120 sekúnd. Tento prenos má znázorňovať oneskorenie, s ktorým začne klimatizácia pri jej zapnutí zahrievať alebo chladiť s plne nastaveným výkonom. Vplyv takzvaného studeného alebo už zohriateho motoru na funkčnosť klimatizácie je nahradený vyššie uvedenou časovou konštantou.

Pre diskretnú verziu modelu bolo potrebné prepočítať prenos zotrvačného článku do diskretného prenosu so vzorkovacou periódou 1 sekunda.

Výsledný prenos v diskretnom tvare znázorňuje nasledujúca rovnica 3.1:

$$F(z) = \frac{0,008299}{z-0,9917} \quad (3.1)$$

#### **3.1.7.4 Okolité vzduch**

Okolité vzduch vplýva na vnútro kabíny auta najmä vtedy, ak otvoríme okná a necháme dovnútra prúdiť vonkajší vzduch. Túto situáciu sme namodelovali pomocou hmotnostného prietoku vzduchu. Nepriamo na teplotu vo vnútri kabíny taktiež vplýva vonkajší vzduch počas jazdy, kedy sa vplyvom nútenej konvekcie výrazne rýchlejšie vykonáva tepelná výmena medzi okolím a karosériou spolu s oknami auta.

## **3.2 Výber Solveru v Simulinku**

Počiatkový vývoj modelu bol vytváraný v spojitom čase. Pre implementáciu v mikrokontroléry bolo potrebné použiť diskretný čas.

### **3.2.1 Spojitá verzia modelu**

Pri výbere Solveru v Simulinku bolo v nastaveniach simulácie odskúšané, že na výpočet simulácie je možné použiť implicitnú metódu ode14x, ako aj všetky dostupné explicitné metódy. Z použiteľných metód bola nakoniec vybraná metóda ode8 (Dormand-Prince) s krokom výpočtu 0.5, ktorá simuláciu vykonávala výrazne rýchlejšie ako ode14x a zároveň zaručovala požadovanú presnosť.

### **3.2.2 Diskretná verzia modelu**

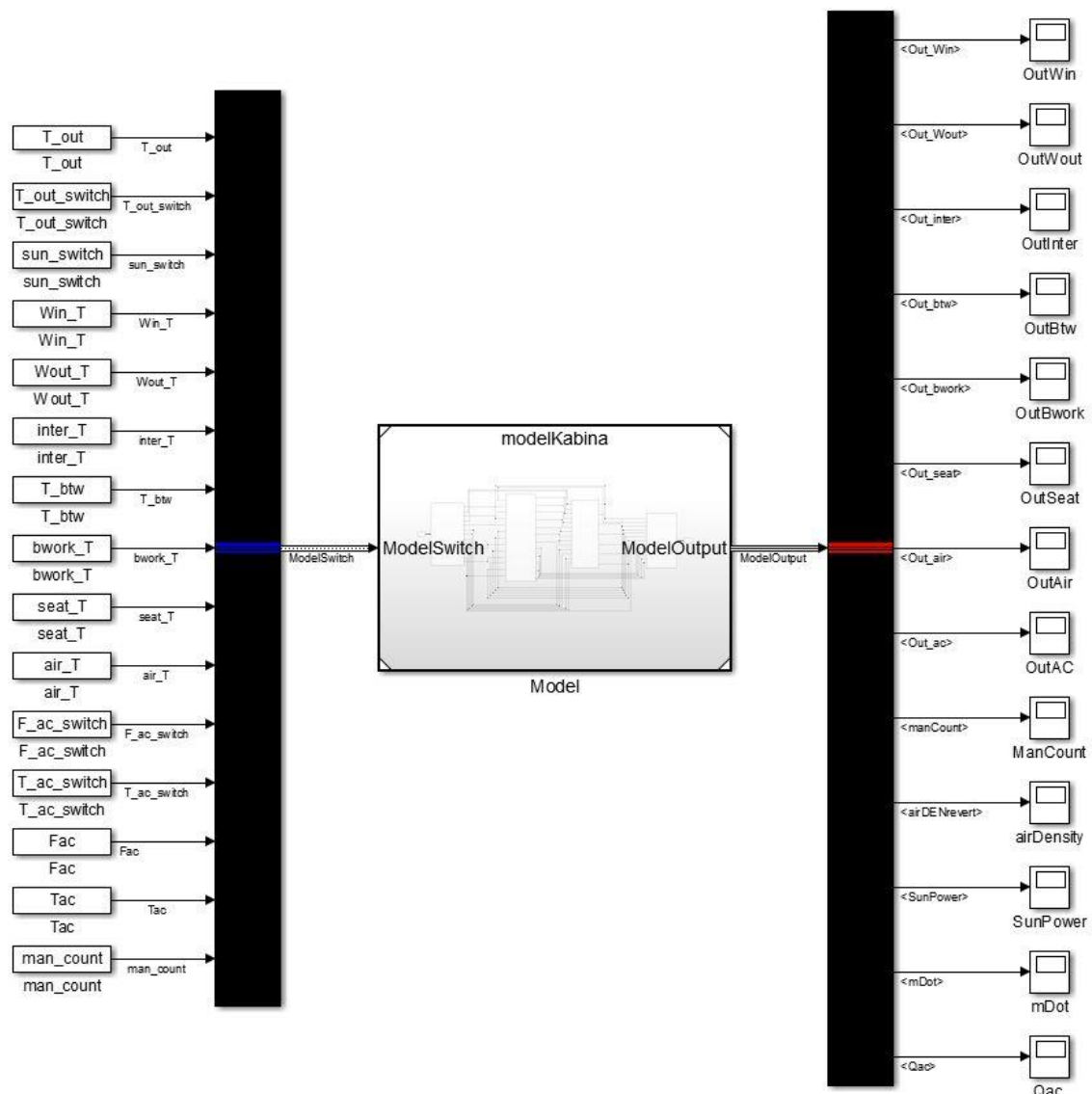
Pre simuláciu na mikrokontroléry v reálnom čase bolo potrebné požiť vzorkovaciu periódou 1 sekunda. Pre výpočet bol použitý solver Ode1 (Euler).

### 3.2.3 Porovnanie diskretného a spojitého modelu

Aby bolo možné v mikrokontroléry nastavovať všetky potrebné premenné rovnako ako v skripte Matlabu, bolo potrebné časti predstavujúce vstupy modelu nahradiť vstupnými portami. Namiesto blokov vykresľujúcich grafy v spojitom modeli, boli použité výstupné porty.

Vďaka týmto úpravám ale nebolo možné diskretný model pre overovanie správnosti prevodu zo spojitého modelu na diskretný správne používať, nakoľko sa do modelu nedostávali potrebné údaje, ako ich aj nebolo možné zobrazovať.

Z tohto dôvodu sme vytvorili modelovú referenciu, ktorá sa taktiež nachádza v prílohách a je zobrazená na nasledujúcom obrázku Obr. 13.



Obr. 13: Modelová referencia modelu kabíny automobilu

Ako vstup do modelu slúži vstupný bus objekt a pre vykresľovanie grafov priamo v simulinku výstupný bus objekt. Modelovú referenciu je taktiež možné spúšťať

bez použitia skriptu v Matlabe, nakoľko boli všetky premenné aj konštanty uložené do takzvaného Data Dictionary, z ktorého sa model inicializuje.

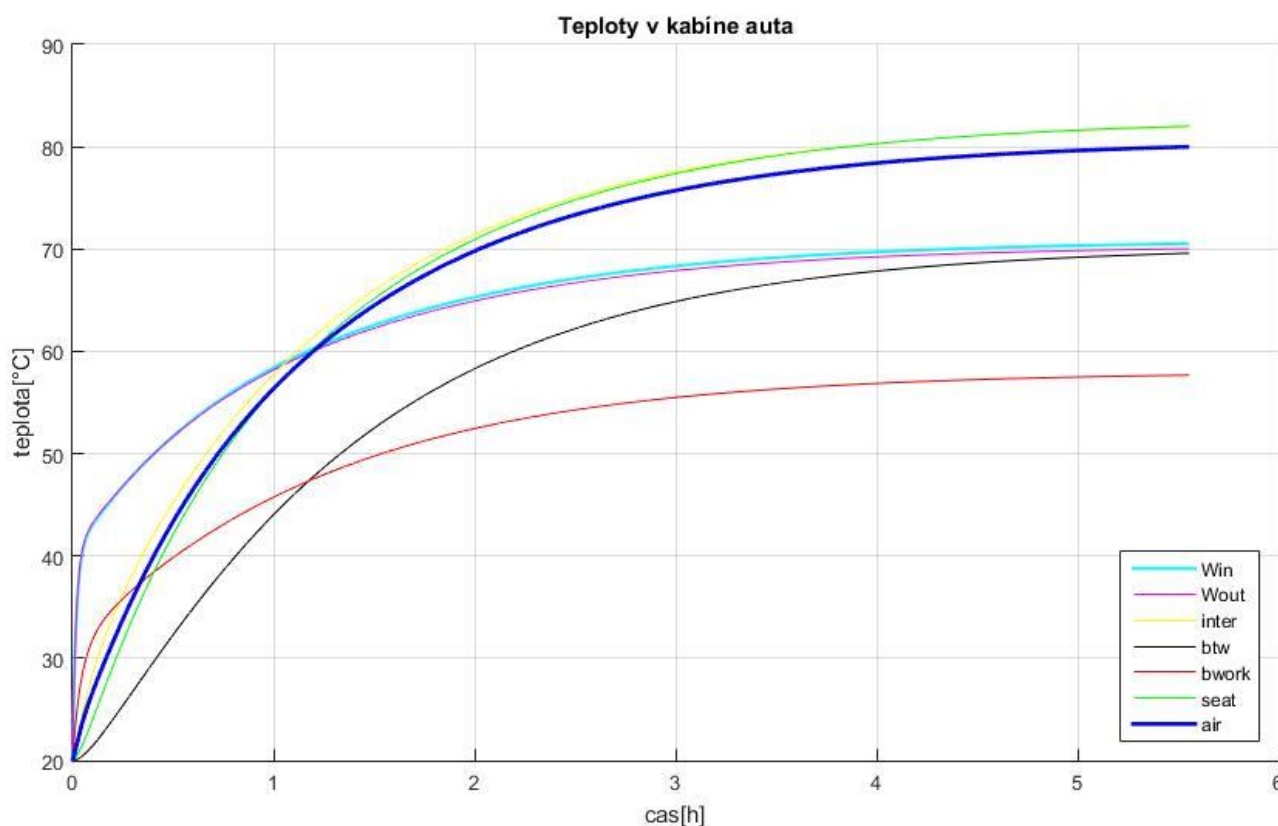
Pri porovnaní výpočtu modelu v Simulinku a modelu v mikrokontroléry boli zistené rozdiely vo výpočte, ktorým sa budeme venovať v nasledujúcich častiach práce.

### 3.3 Výsledné priebehy teplôt v modeli

Pre zadávanie rôznych modelových situácií je v skripte vytvorená podmienka ovládaná hodnotou premennej stav. Výberom daného stavu sa nastaví počiatočné hodnoty teplôt, ako aj stavov určujúcich výpočet pre žiadanú modelovú situáciu, ktorých bolo vytvorených 5, v ktorých sú menené jednotlivé počiatočné podmienky. Pre HIL simuláciu bol vytvorený aj stav6, opísaný v kapitole 5.

#### 3.3.1 Zaparkované auto počas horúceho bezveterného letného dňa

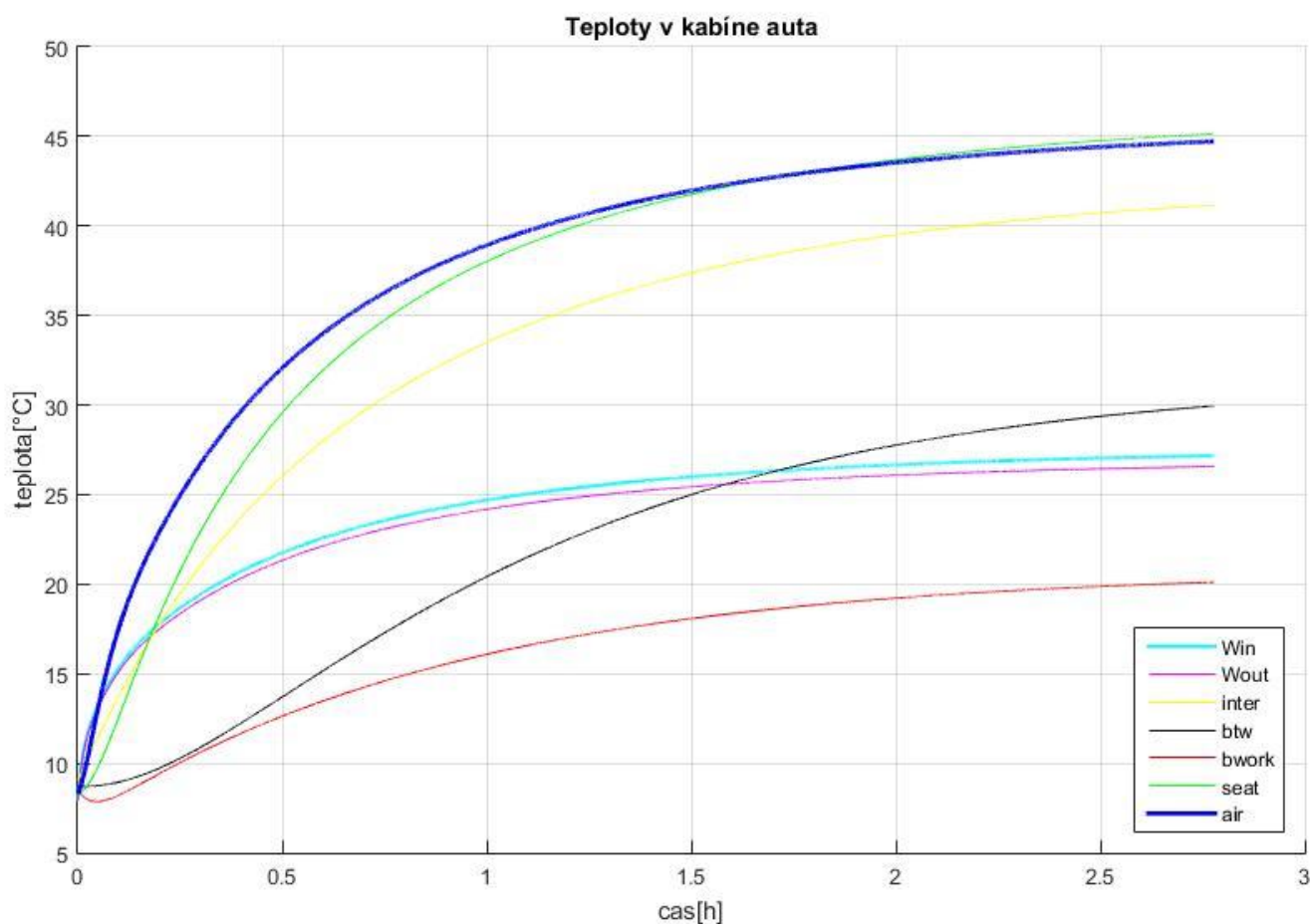
Nasledujúci priebeh z grafu Graf č. 1 je výsledkom simulácie, ktorej počiatočné podmienky boli zadane pomocou hodnoty stavu 1, ktorý predstavuje zaparkované auto, s počiatočnými hodnotami teplôt 20 °C, na ktoré svieti Slnko s konštantným tepelným výkonom 324 W s konštantnou teplotou okolitého vzduchu 40 °C s vlhkosťou 40 % a tlakom 1013,25 hPa, ktoré sú taktiež zadávané ako konštanty.



Graf č. 1: Horúci letný slnečný deň bez ľudí, bez jazdy, bez klimatizácie

### 3.3.2 Zaparkované auto počas chladného jesenného dňa so spustenou klimatizáciou, 2 ľudmi v aute a miernym vetrom

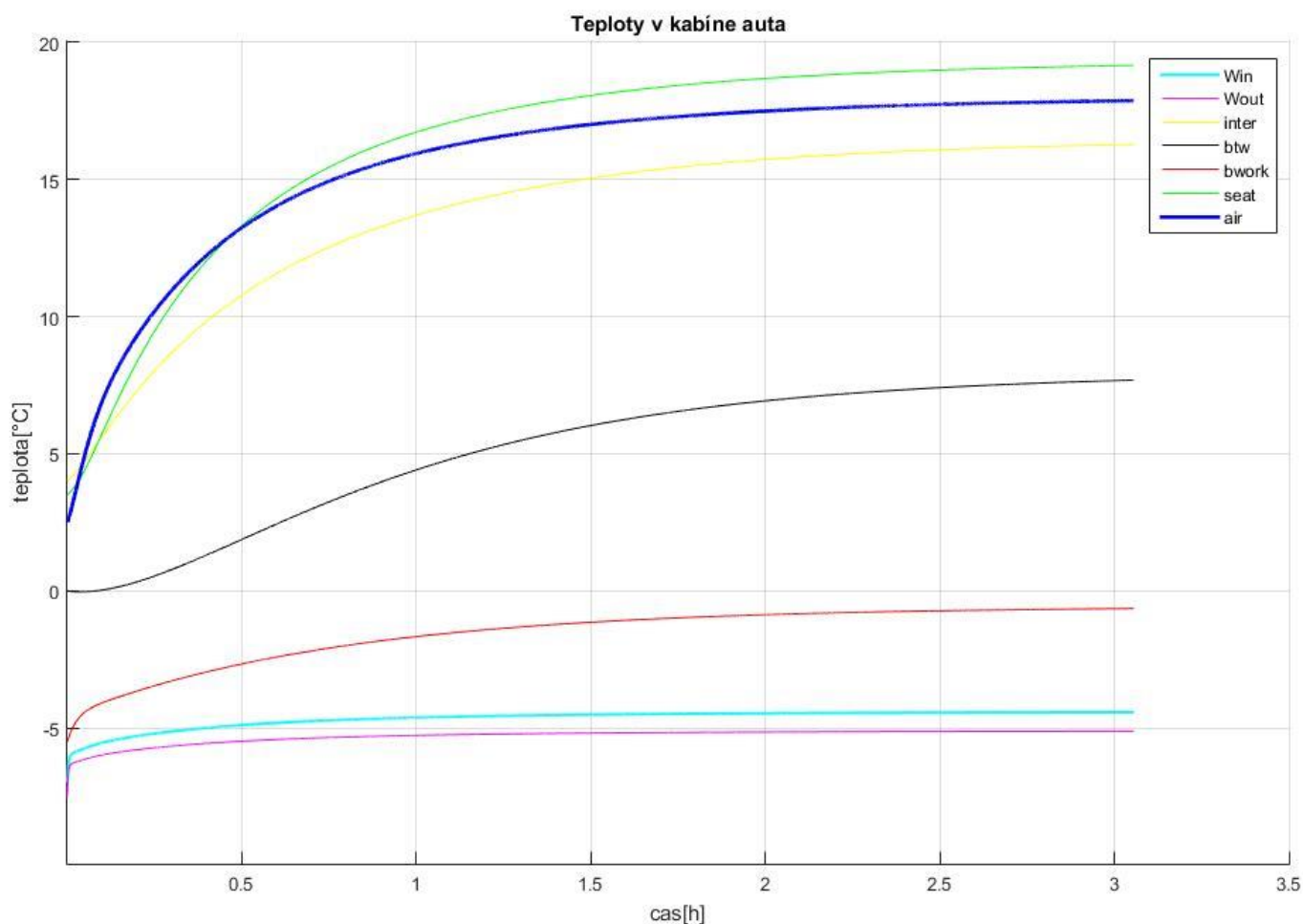
Nasledujúci priebeh z grafu Graf č. 2 je výsledkom simulácie, ktorej počiatočné podmienky boli zadané pomocou hodnoty stavu 4, ktorý predstavuje zaparkované auto, s rôznymi počiatočnými hodnotami teplôt, kde na auto svieti Slnko s konštantným tepelným výkonom 200 W s konštantnou teplotou okolitého vzduchu 5,5 °C s vlhkosťou 74 % a tlakom 980 hPa, ktoré sú taktiež zadávané ako konštanty. Do modelu bol zadán taktiež okolitý vietor s veľkosťou 0,4 m/s. Klimatizácia bola nastavená na konštantnú teplotu 50 °C. Jedná sa o simulovaný priebeh s rovnakými podmienkami, aké boli zistené pri orientačnom meraní opísanom v nasledujúcej kapitole.



Graf č. 2: Chladný jesenný zamračený deň s 2 ľudmi so spustenou klimatizáciou

### 3.3.3 Jazda autom počas zimného slnečného dňa

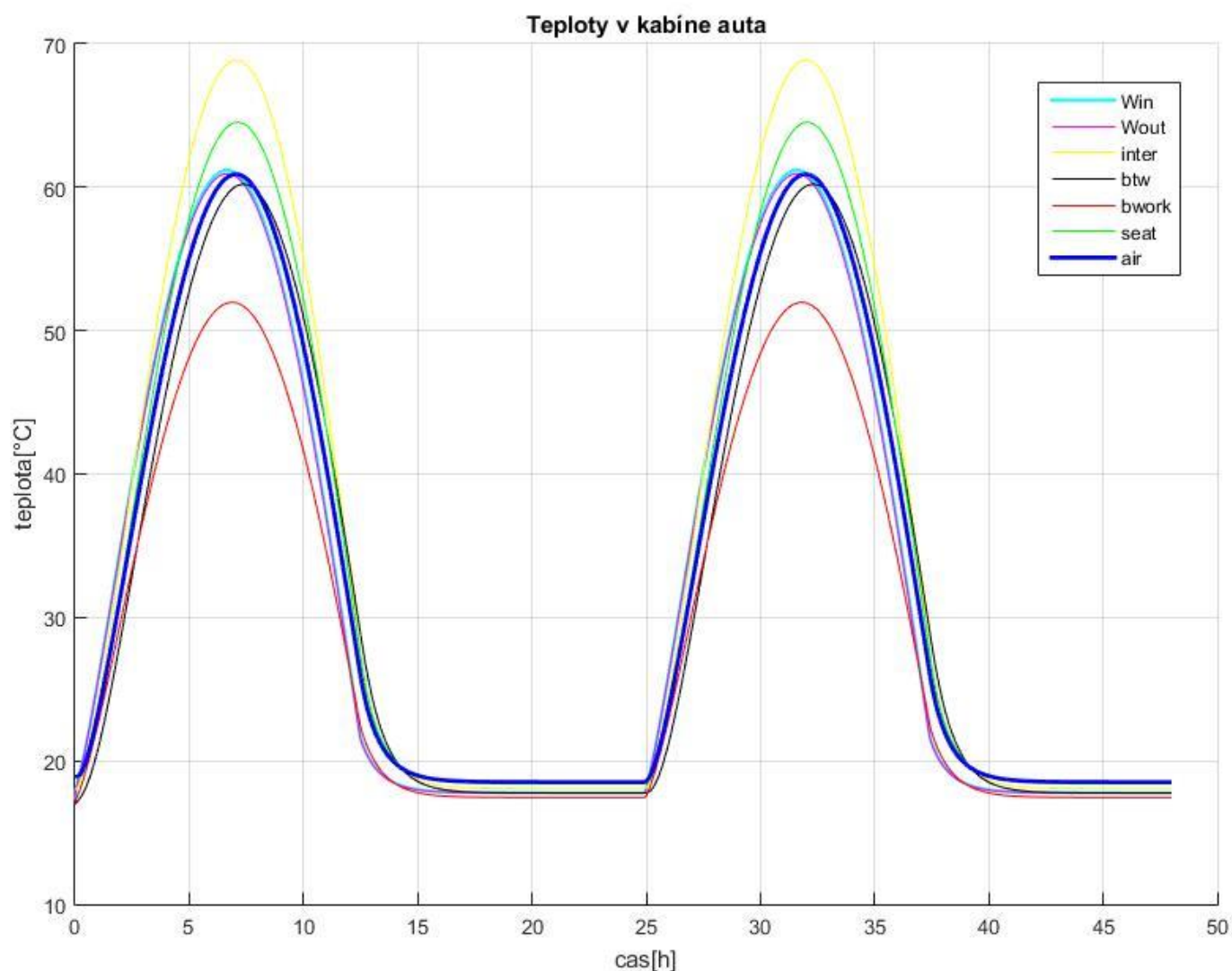
Nasledujúci priebeh z grafu Graf č. 3 je výsledkom simulácie, ktorej počiatkové podmienky boli zadane pomocou hodnoty stavu 5, ktorý predstavuje jazdu autom rýchlosťou 50 km/h pri vonkajšej teplote  $-8^{\circ}\text{C}$ , vlhkosťou 70 % a tlakom 1000 hPa. Na auto svieti Slnko s konštantným tepelným výkonom 170 W. Počiatkové teploty jednotlivých častí auta sú v rozsahu od  $-7,5$  do  $4^{\circ}\text{C}$ . Teplota vzduchu z klimatizácie bola nastavená na  $20^{\circ}\text{C}$  a počet ľudí v aute bol zadany na 4.



Graf č. 3: Chladný zimný deň so 4 ľuďmi a so spustenou klimatizáciou

### 3.3.4 Zaparkované auto počas striedania dňa a noci v lete

Nasledujúci priebeh z grafu Graf č. 4 je výsledkom simulácie, ktorej počiatkové podmienky boli zadane pomocou hodnoty stavu 2, ktorý predstavuje priebeh teplôt zaparkovaného auta od rána až do ďalšieho rána pri vonkajšej teplote v noci  $17^{\circ}\text{C}$  a s maximálnou teplotou okolitého vzduchu  $40^{\circ}\text{C}$ , vlhkosťou 40 % a tlakom 1013,25 hPa. Na auto svieti Slnko s tepelným výkonom od 0 do 342 W. Počiatkové teploty jednotlivých častí auta sú v rozsahu od  $17$  do  $19^{\circ}\text{C}$ .



Graf č. 4: Jednotlivé teploty častí auta pri striedaní letného dňa a noci

Nasledujúca tabuľka Tab. 3 obsahuje ustálené hodnoty teplôt jednotlivých častí kabíny zo simulácie v Simulinku zistenej pomocou Linear Analysis Tool, ktorým sme určili ustálené hodnoty v jednotlivých modelových stavoch.

Tab. 3: Ustálené hodnoty teplôt jednotlivých častí kabíny

	Časť kabíny	Modelový stav simulácie				
		stav 1	stav 2	stav 3	stav 4	stav 5
Teplota [°C]	Win	70,8651	17,7677	32,6297	27,5291	-4,4092
	Wout	70,3632	17,7489	32,4027	26,9194	-5,1045
	Inter	82,6337	18,0664	44,6626	42,3567	16,4695
	btw	70,3249	17,756	39,8318	31,5575	7,9485
	bwork	58,0159	17,4456	35,0051	20,7609	-0,5653
	seat	82,7366	18,4041	37,195	46,1834	19,3293
	air	80,6568	18,5166	31,4242	45,5702	18,0058



### 3.4 Meranie kabíny automobilu

Pre overenie správnosti modelu bolo vykonané orientačné meranie teplôt v kabíne automobilu Ford Focus combi r.v. 2007. Výsledky merania boli spracované formou protokolu a nachádzajú sa aj so všetkými priloženými súbormi v prílohách. Pre názornosť je na obrázku Obr. 14 zaznamenaný termogram z kontrolného merania v čase 31 minút po spustení klimatizácie s nastavenou teplotou 50 °C a 2 ľuďmi v kabíne automobilu.

Pomocou merania sme taktiež určili prietok klimatizácie, ktorý sme následne nastavili do modelu, ktorý je možné nastavovať rovnako ako v nami meranom aute v stupňoch výkonu od hodnôt 0 do 7.

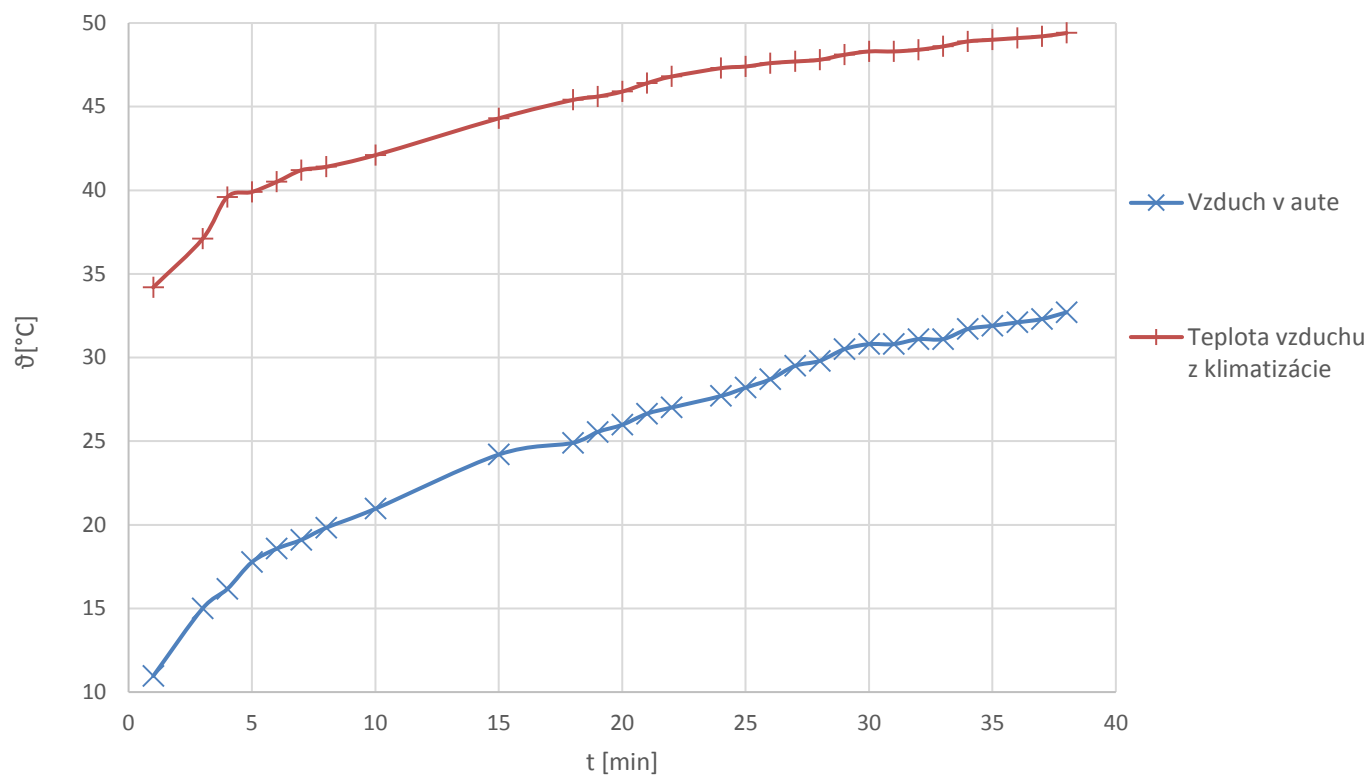
Nameranú teplotu vzduchu vychádzajúceho z klimatizácie sme následne použili v nami vytvorenom modeli pre porovnanie simulačného priebehu teploty vzduchu v kabíne s nameranými údajmi, ktorého grafický priebeh je znázornený na nasledujúcom grafe Graf č. 6.



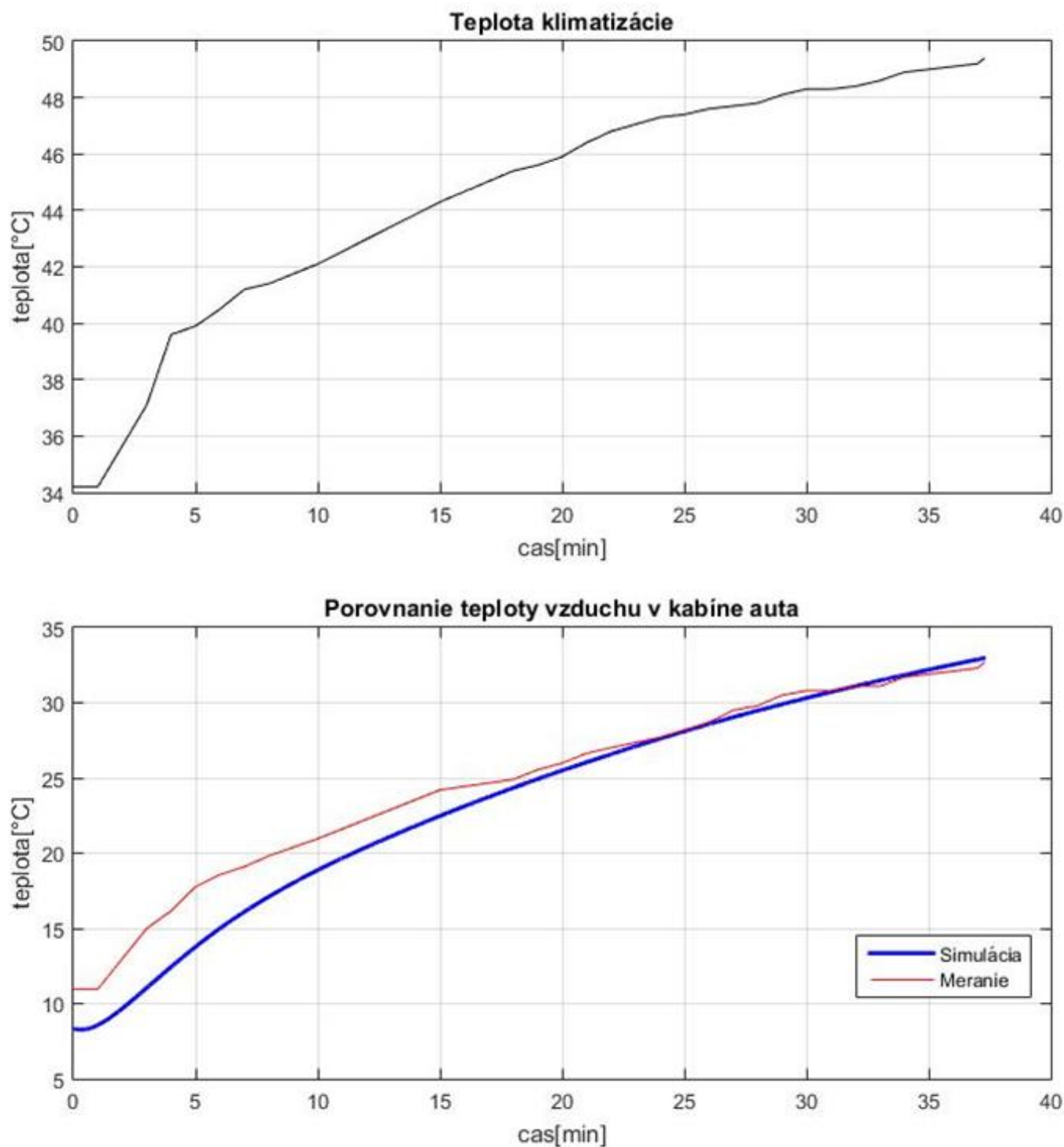
Obr. 14: Termogram sedačiek po zahriatí kabíny

Závislosť teploty vzduchu v aute po nastúpení 2 ľudí a zapnutí klimatizácie s nastavenou teplotou 50 °C zobrazuje nasledujúci Graf č. 5:

Graf č.5: Teplota vzduchu v aute



Graf č. 5: Teplota vzduchu v aute

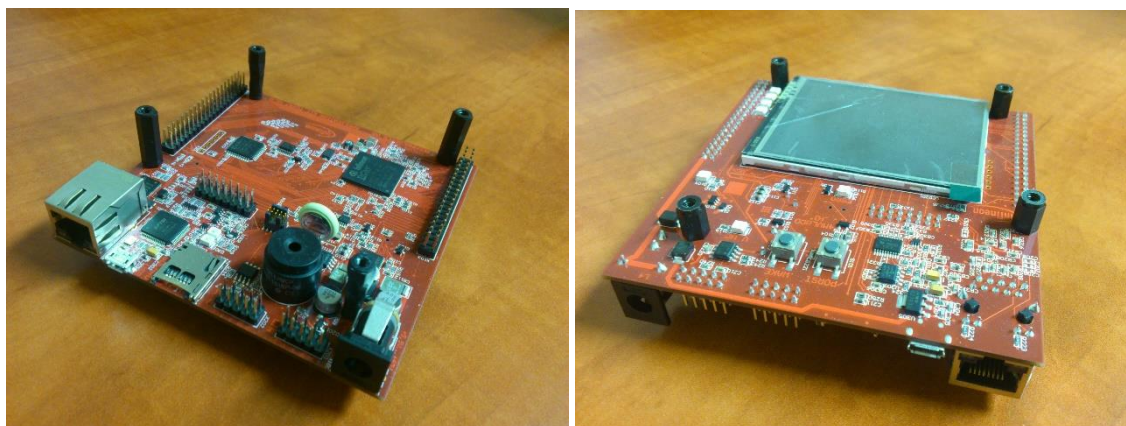


Graf č. 6: Porovnanie simulovanej a nameranej teploty vzduchu

Počiatkové podmienky teploty vzduchu v porovnávacom grafe Graf č. 6 majú rozdielne hodnoty. Je to spôsobené tým, že sme merali teplotu vzduchu iba v prednej časti kabíny, zatiaľ čo model počíta s celým objemom vzduchu v kabíne. Výsledný protokol z daného merania sa nachádza v prílohách (Príloha 9).

## 4 IMPLEMENTÁCIA MODELU DO MIKROKONTROLÉRU

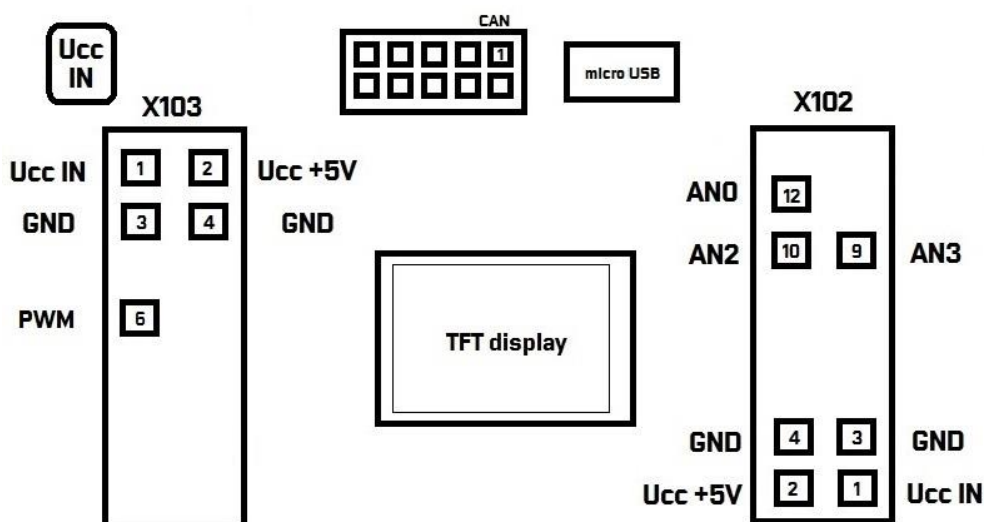
Pre HIL Simuláciu bol použitý mikrokontrolér Aurix Tricore na PCB ApplicationKit TC277D, ktorý je na nasledujúcom obrázku Obr. 15.



Obr. 15: ApplicationKit TC277D

### 4.1 Využitie periférie, vstupné a výstupné porty

V použítom mikrokontroléry je možné pre komunikáciu s riadiacou jednotkou, ktorej by mikrokontrolér odosielať údaje o teplote vzduchu v kabíne použiť LIN zbernicu, DA prevodník a PWM. Pôvodne bol predpoklad použitia LIN, nakoľko bol ale pre vývoj použitý iný typ AppKitu ovládajúceho riadiacu jednotku automobilu a pre použitie DA prevodníku by bolo potrebné tento prevodník zvlášť dokúpiť, tak bola nakoniec využitá možnosť s PWM.



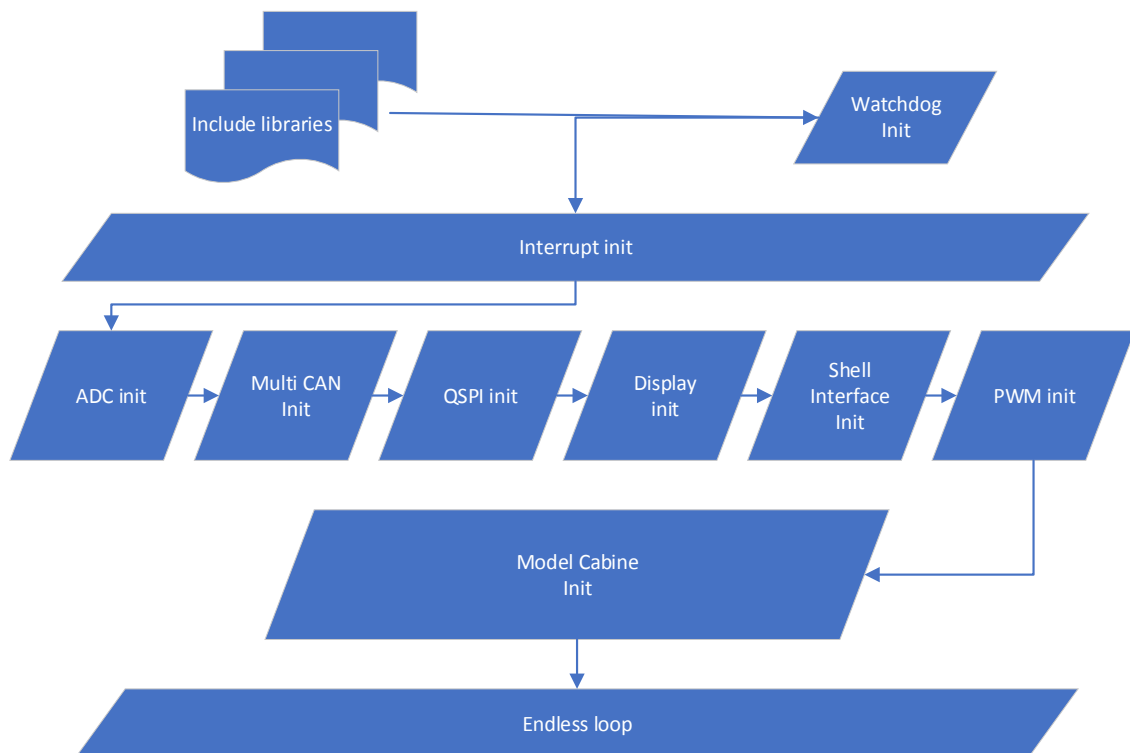
Obr. 16: Ilustračný opis použitých portov a periférií

## 4.2 Opis algoritmov v mikrokontroléry

Kód bol vytváraný v jazyku C. Časť kódu zahŕňajúci model kabíny automobilu bol vytváraný za pomoci automatického generovania kódu v Simulinku. Kód modelu kabíny bol následne implementovaný do projektu pre mikrokontrolér.

### 4.2.1 main.c

Na nasledujúcom obrázku Obr. 17 je zobrazený blokový diagram hlavnej časti programu (main.c).



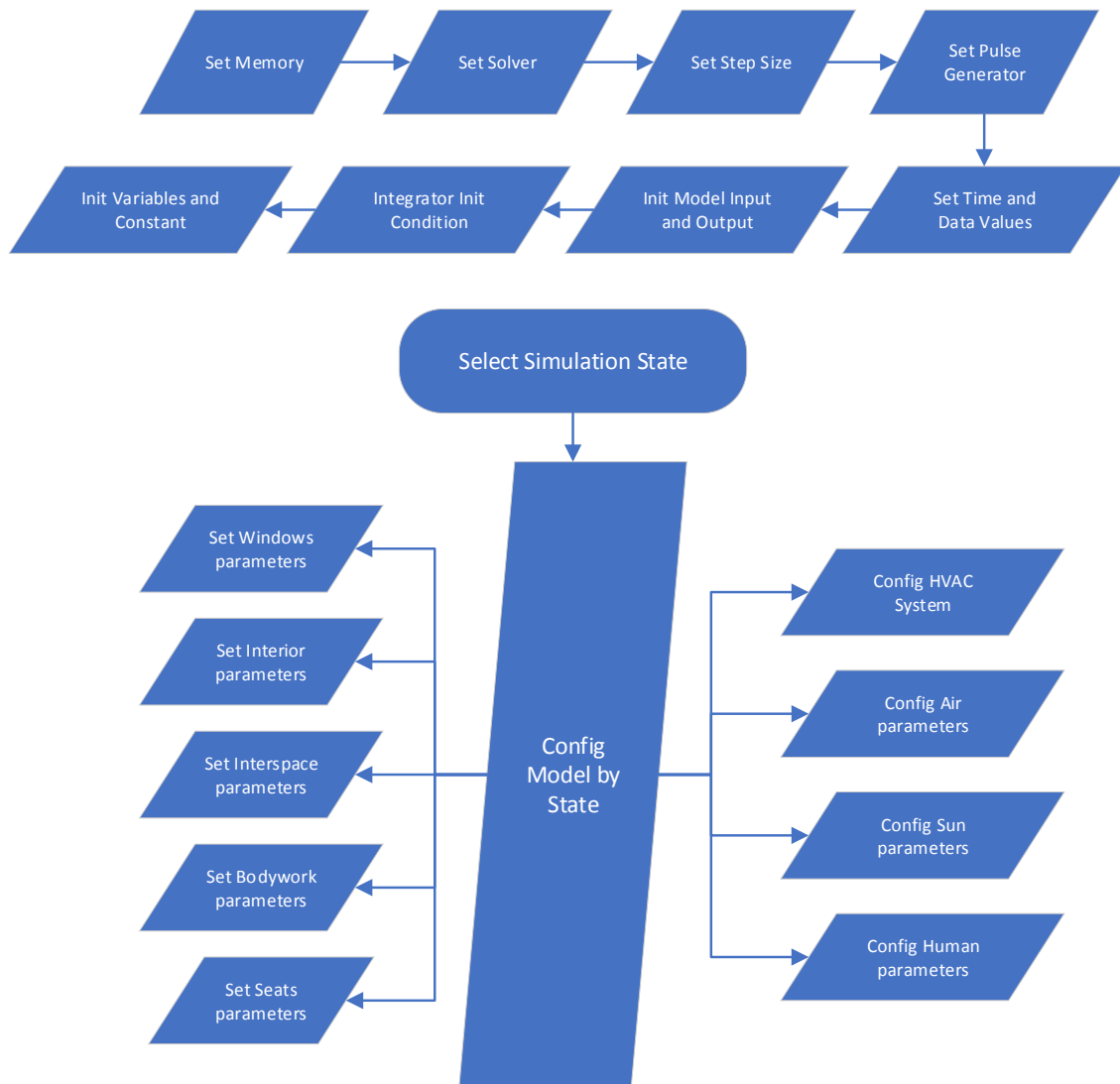
Obr. 17: Blokový diagram hlavnej časti programu

Kód začína zahrnutím potrebných knižníc a inicializáciou Watchdogu. Aby simulácia v mikrokontroléry prebiehala v reálnom čase bolo potrebné inicializovať 1 sekundové prerušenie, ktorým sa v nekonečnej slučke spúšťa krok simulácie. Najskôr sa inicializuje AD prevodník potrebný pre získavanie údajov zo snímačov, následne CAN zbernica pre prijímanie dát od riadiacej jednotky automobilu. Taktiež bolo potrebné inicializovať QSPI zbernica, ktorú mikrokontrolér používa pre komunikáciu s napájacím obvodom a taktiež zaistí funkciu Watchdogu. Displej je inicializovaný pre výpis údajov v prípade nevyužitia možnosti zápisu údajov pomocou Shell Interface. Po inicializácii PWM používanej pre odosielanie údajov o teplote vzduchu v kabíne automobilu sa inicializujú parametre samotnej kabíny automobilu a následne prejde vykonávaný kód do nekonečnej slučky.

### 4.2.2 modelCabine INIT

Inicializácia modelu bola vytvorená tak, že je možné si vybrať jeden z 5 prednastavených stavov opisovaných aj graficky v predchádzajúcej kapitole (3.3), ako aj šiesty simulačný stav určený pre HIL simuláciu.

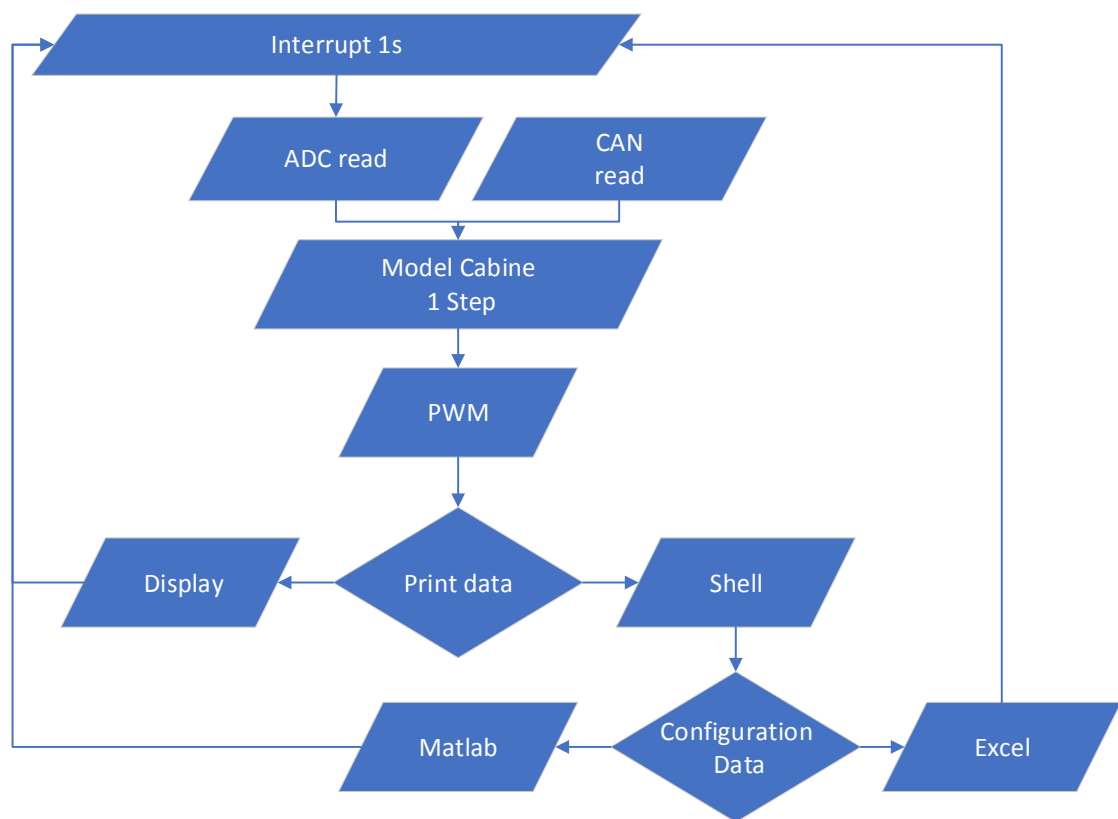
Výberom daného stavu sa prednastavia všetky potrebné parametre. Pred kompiláciou programu je taktiež možné v kóde nastaviť jednotlivé parametre manuálne.



Obr. 18: Blokový diagram konfiguračnej časti programu

### 4.2.3 Endless loop

Základom kódu v nekonečnej slučke je 1 sekundové prerušenie. Mimo neho sa vykonáva príjem správ po CAN zbernici. V prerušení sa najskôr vyčítajú údaje z AD prevodníkov. Tieto údaje sa následne prepočítavajú na teplotu použiteľnú vo výpočte simulácie. Po získaní potrebných údajov sa vykoná 1 krok simulácie a pomocou PWM sa prevedie teplota vzduchu v kabíne automobilu na obdĺžnikový signál s odpovedajúcou striedou (duty cycle). Následne sa vyberie, či budú výstupné údaje zapísané na displej alebo budú pomocou Shell Interface zapisované cez Putty konzolu do CSV súboru formátovaného pre Excel alebo Matlab.



Obr. 19: Blokový diagram nekonečnej slučky

## 4.3 Komunikácia s riadiacou jednotkou automobilu

Vo fyzickom automobile sa v kabíne auta meria teplota vzduchu pomocou snímača napojeného na riadiacu jednotku automobilu, ktorá ovláda klimatizáciu.

Implementovaný model kabíny mikrokontroléru nahrádza samotnú kabínu auta, ako aj snímač, ktorým sa meria teplota vzduchu v kabíne.

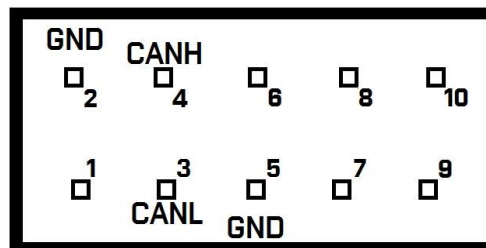
### 4.3.1 Prijímanie údajov

Model kabíny v mikrokontroléry prijíma od riadiacej jednotky automobilu údaje o teplote vzduchu vychádzajúceho z klimatizácie, ako aj hmotnostný prietok vzduchu z klimatizácie pomocou CAN zbernice.

#### 4.3.1.1 CAN

Identifikačné číslo správy od riadiacej jednotky pre teplotu vzduchu z klimatizácie je 0x201 a ID číslo pre hmotnostný prietok je 0x103.

Správy sú prijímané v podobe 16 bitového čísla, ktoré sa následne prepočtom spracováva. Zapojenie pinov v CAN konektore na mikrokontroléry zobrazuje nasledujúci obrázok Obr. 20.



Obr. 20: Opis pinov CAN konektoru

### 4.3.2 Odosielanie údajov

Model kabíny v mikrokontroléry odosiela riadiacej jednotke automobilu údaj o teplote vzduchu v kabíne pomocou PWM, ktorá generuje obdĺžnikový signál s amplitúdou 5 V a s definovanou striedou odpovedajúcej teplote vzduchu v kabíne. Tento signál sa následne vyfiltruje pomocou RC článku, ktorý upraví obdĺžnikový signál s danou striedou na odpovedajúce jednosmerné napätie merané riadiacou jednotkou automobilu.

Pomocou PWM signálu a RC článku je v podstate simulovaný teplotný snímač, ktorý sa v automobiloch používa pre meranie teploty vzduchu v kabíne.

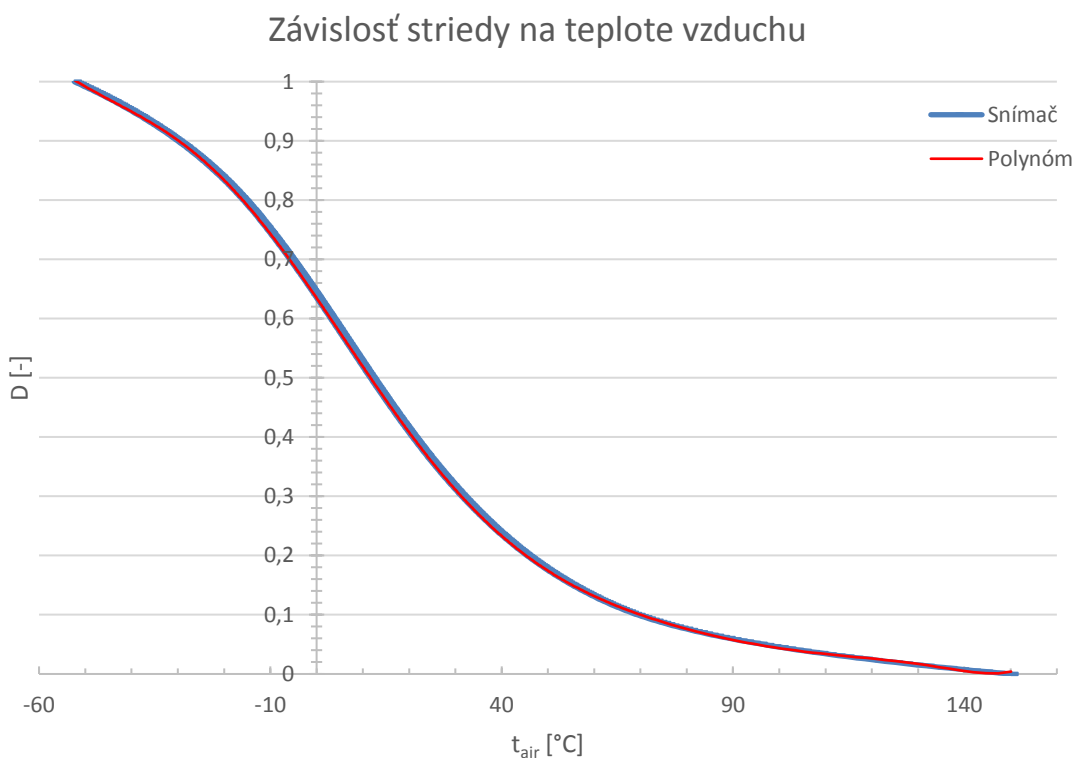


#### 4.3.2.1 PWM

Pomocou nasledujúcej rovnice (4.1) je generovaná strieda PWM signálu v rozsahu od 0 do 1 v závislosti na teplote vzduchu v kabíne automobilu.

$$D(t_{\text{air}}) = 0,6346209850769026 - 0,011419454859975973 \cdot t_{\text{air}} - 0,0000362734505381345 \cdot t_{\text{air}}^2 + 0,00000208149125236518 \cdot t_{\text{air}}^3 + 3,85072573328 \cdot 10^{-9} \cdot t_{\text{air}}^4 - 3,7776059678 \cdot 10^{-10} \cdot t_{\text{air}}^5 + 1,54308617 \cdot 10^{-12} \cdot t_{\text{air}}^6 + 2,427556 \cdot 10^{-14} \cdot t_{\text{air}}^7 - 2,316 \cdot 10^{-16} \cdot t_{\text{air}}^8 + 5,7 \cdot 10^{-19} \cdot t_{\text{air}}^9 \quad (4.1)$$

Na nasledujúcom grafe Graf č. 7 je vykreslená závislosť generovanej striedy od teploty vzduchu vytvorenej na základe nameraných údajov od snímača, ktorý je pomocou PWM a RC článku nahrádzaný, ako aj závislosť polynómu z rovnice (4.1). Namerané údaje meracieho obvodu so snímačom sa nachádzajú v prílohe (Príloha 11).



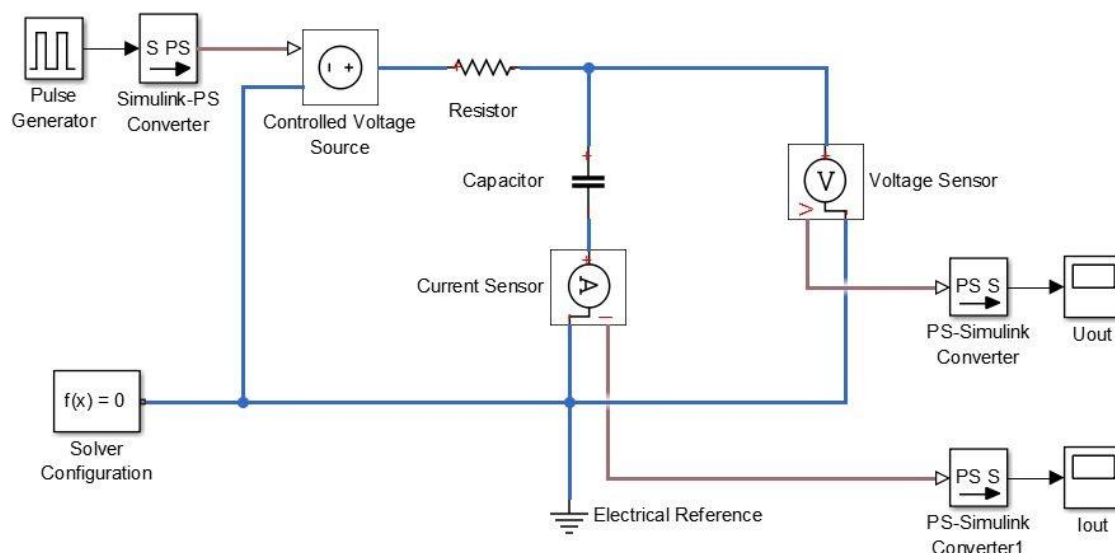
Graf č. 7: Závislosť striedy na teplote vzduchu

Samotný PWM signál je generovaný s frekvenciou 10 kHz na porte P10.7 označený na obrázku Obr. 16, ako port 6, nakoľko je daný pin v konektore šiesty v poradí.

#### 4.3.2.2 RC článok

RC článok v našom prípade slúži ako filter a náhrada časovej konštanty teplotného snímača.

Pre návrh RC článku bol použitý Simscape, ako súčasť Simulinku. Skript aj model pre RC článok sa nachádza v prílohe (Príloha 8). Návrh opisuje nasledujúca schéma na obrázku Obr. 21.



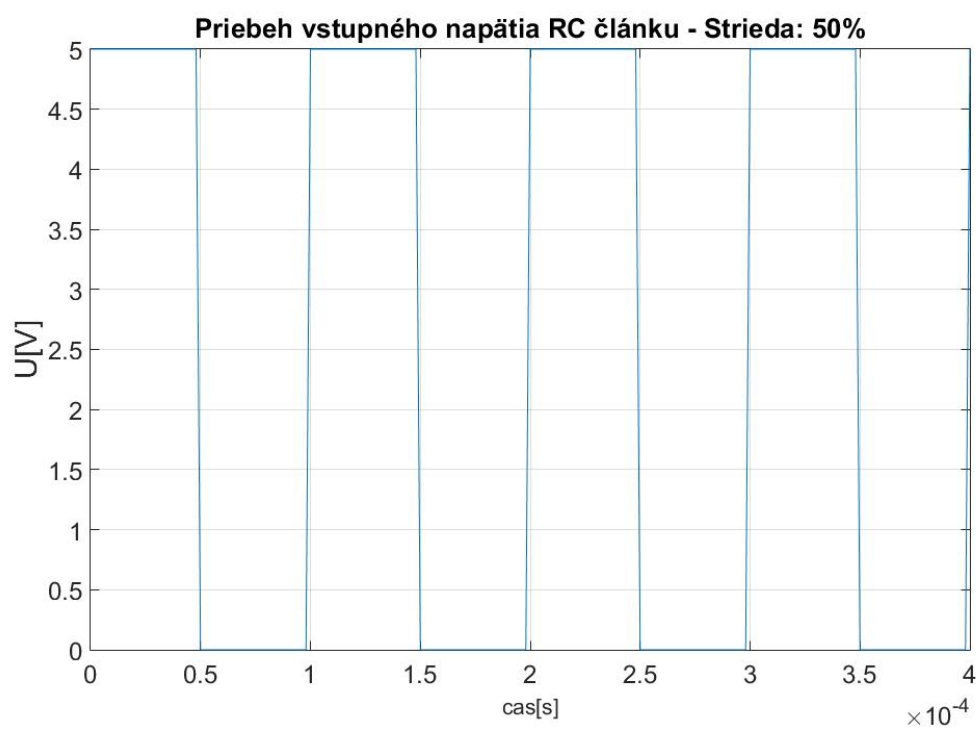
Obr. 21: Simscape schéma pre návrh RC článku

Hodnoty rezistoru a kondenzátoru bolo potrebné zvoliť tak, aby časová konštanta RC článku odpovedala hodnotám časových konštánt snímačov teploty použitých pre snímanie teploty vzduchu v kabíne automobilu.

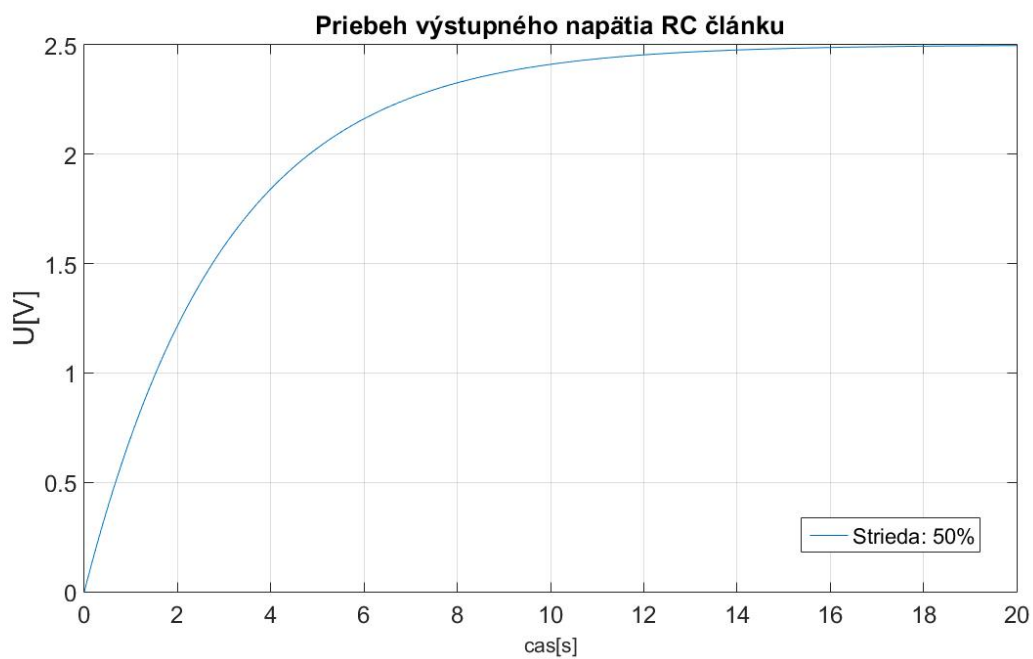
Pre výpočet parametrov bola zvolená časová konštanta RC článku 3 sekundy. Ďalším dôležitým parametrom bola prúdová zaťažiteľnosť portu, na ktorom je generovaný PWM signál a napojený RC článok. Z tohto dôvodu bolo potrebné použiť kondenzátor s malou kapacitou. Pre výpočet parametrov bola použitá nasledujúca rovnica (4.2).

$$\tau = R_{RC} \cdot C_{RC} \quad (4.2)$$

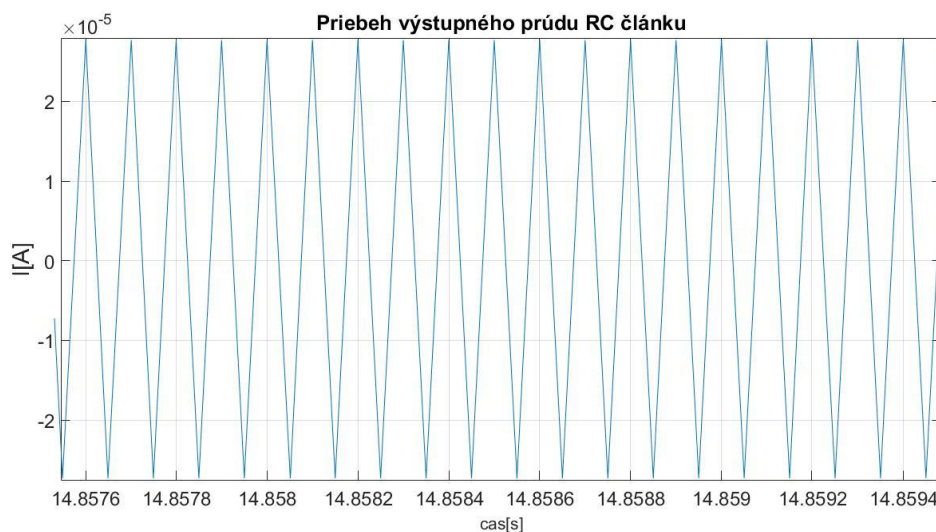
Po zohľadnení dostupných elektronických súčiastok bol vykonaný výpočet podľa rovnice (4.2) s kondenzátorom s kapacitou 33  $\mu\text{F}$ , po ktorom vyšla hodnota potrebného odporu približne 90,9  $\text{k}\Omega$ , ktorý bol nastavený pomocou odporového trimru. Nasledujúce grafy Graf č. 8 a Graf č. 9 zobrazujú výstupné priebehy napätia a prúdu z RC článku, v ktorom sme použili tantalový kondenzátor.



Graf č. 8: Vstupný priebeh napätia RC článku pri  $D(t_{air}) = 0,5$



Graf č. 9: Výstupný priebeh napätia RC článku pri  $D(t_{air}) = 0,5$



Graf č. 10: Detail výstupného priebehu prúdu RC článku pri  $D(t_{air}) = 0,5$

Navrhnutý RC článok bol kvôli jednoduchej výmene použitých súčiastok realizovaný na skúšobnom kontaktnom poli. Použitím odporového trimru je taktiež možné jednoduchou zmenou odporu meniť časovú konštantu RC článku. Vďaka tomu je možné taktiež simulovať časovú odozvu rôznych teplotných snímačov.

## 4.4 Spracovanie údajov z mikrokontroléru

Pre spracovanie údajov je v kóde možné zvoliť iba jednu z ponúkaných možností, ktorá musí byť vykonaná pred kompiláciou kódu. Počiatočným nastavením je ukladanie dát do CSV súboru pre Matlab.

### 4.4.1 Displej

```

Group 0 Channel 0: 36
Group 0 Channel 2: 29
Group 0 Channel 3: 29
STRIEDA: 8.518498
Okna zvnutra: I_Min = 11.4460 °C
Okna z vonku: I_Max = 11.3589 °C
Interior: I_inter = 10.1332 °C
Medzipriestor: I_btwn = 8.7108 °C
Karoseria: I_bwork = 8.8000 °C
Sedacky: I_seat = 8.7153 °C
Uzduch v aute: I_air = 10.0334 °C
HVAC System: I_ac = 50.0 °C, P:7

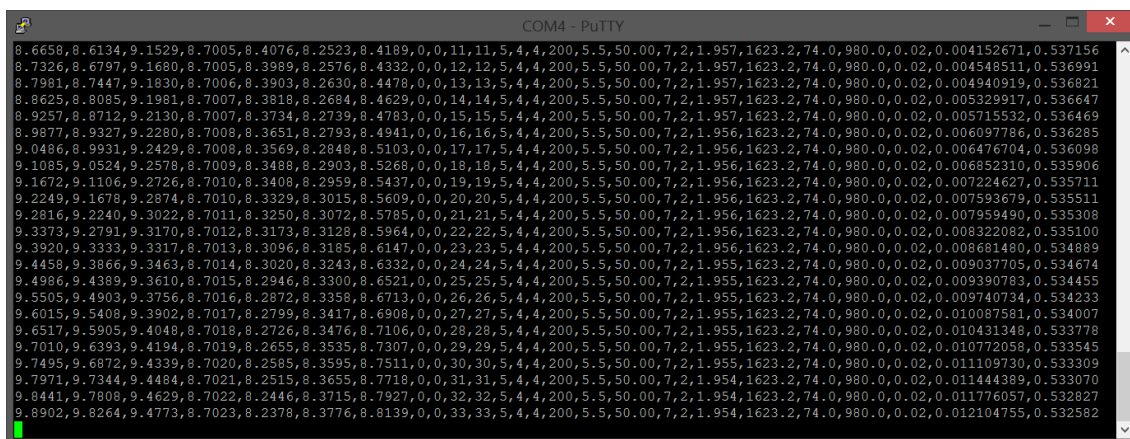
PP:7.9;7.9;9.0;8.7;8.5;8.2;8.3°C
Switch F_ac: 5, SunPower:200 W
Switch I_ac: 4, Stav:4, Tout:5.5°C
Pocet ludi v kabine: 2, AD:1.945 kgm3
AirC:1623.2, RH:74.0%, AP:960.0hPa
SimTime = H: 0, M: 1, S: 20

```

Obr. 22: Ukážka výpisu dát na displej

Prvé 3 riadky na displeji vypisujú teplotu z troch snímačov pripojených na AD prevodníky, ďalším údajom je hodnota striedy PWM v percentách. Nasledujú simulované hodnoty teploty jednotlivých častí kabíny a nastavená teplota a výkonnostný stupeň klimatizácie. V časti PP sa vypisujú počiatočné teploty jednotlivých častí kabíny v rovnakom poradí, ako sú uvedené ich simulované hodnoty. Switch F\_ac a Switch T\_ac ukazujú nastavenie hmotnostného prietoku a teploty vzduchu z klimatizácie z prepínača, ktorým sa nastavuje konkrétne správanie klimatizácie. SunPower zobrazuje tepelný výkon, ktorým pôsobí Slnčné žiarenie. Stav označuje vybraný simulačný stav, Tout vonkajšiu teplotu. Vypisujú sa taktiež údaje o kabíne, ako počet ľudí v nej, AD – hustota vzduchu, AirC – merná tepelná kapacita, vlhkosť a tlak vzduchu, ako aj simulačný čas.

#### 4.4.2 Shell Interface - Putty



```

8.6658,8.6134,9.1529,8.7005,8.4076,8.2523,8.4189,0,0,11,11,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.957,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.004152671,0.537156
8.7326,8.6797,9.1680,8.7005,8.3989,8.2576,8.4332,0,0,12,12,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.957,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.004548511,0.536991
8.7981,8.7447,9.1830,8.7006,8.3903,8.2630,8.4478,0,0,13,13,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.957,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.004940919,0.536821
8.8625,8.8085,9.1981,8.7007,8.3818,8.2684,8.4629,0,0,14,14,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.957,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.005329917,0.536647
8.9257,8.8712,9.2130,8.7007,8.3734,8.2739,8.4783,0,0,15,15,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.957,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.005715532,0.536469
8.9877,8.9327,9.2280,8.7008,8.3651,8.2793,8.4941,0,0,16,16,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.006097786,0.536285
9.0486,8.9931,9.2429,8.7008,8.3569,8.2848,8.5103,0,0,17,17,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.006467604,0.536098
9.1085,9.0524,9.2578,8.7009,8.3488,8.2903,8.5268,0,0,18,18,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.006852310,0.535906
9.1672,9.1106,9.2726,8.7010,8.3408,8.2959,8.5437,0,0,19,19,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.007224627,0.535711
9.2249,9.1678,9.2874,8.7010,8.3329,8.3015,8.5609,0,0,20,20,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.007593679,0.535511
9.2816,9.2240,9.3022,8.7011,8.3250,8.3072,8.5785,0,0,21,21,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.007959490,0.535308
9.3373,9.2791,9.3170,8.7012,8.3173,8.3128,8.5964,0,0,22,22,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.008322082,0.535100
9.3920,9.3333,9.3317,8.7013,8.3096,8.3185,8.6147,0,0,23,23,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.956,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.008681480,0.534889
9.4459,9.3866,9.3463,8.7014,8.3020,8.3243,8.6332,0,0,24,24,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.009037705,0.534674
9.4986,9.4389,9.3610,8.7015,8.2946,8.3300,8.6521,0,0,25,25,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.009390783,0.534455
9.5505,9.4903,9.3756,8.7016,8.2872,8.3358,8.6713,0,0,26,26,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.009740734,0.534233
9.6015,9.5408,9.3902,8.7017,8.2799,8.3417,8.6908,0,0,27,27,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.010087581,0.534007
9.6517,9.5905,9.4048,8.7018,8.2726,8.3476,8.7106,0,0,28,28,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.010431348,0.533778
9.7010,9.6393,9.4194,8.7019,8.2655,8.3535,8.7307,0,0,29,29,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.010772058,0.533545
9.7495,9.6872,9.4339,8.7020,8.2585,8.3595,8.7511,0,0,30,30,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.955,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.011109730,0.533309
9.7971,9.7344,9.4484,8.7021,8.2515,8.3655,8.7718,0,0,31,31,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.954,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.011444389,0.533070
9.8441,9.7808,9.4629,8.7022,8.2446,8.3715,8.7927,0,0,32,32,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.954,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.011776057,0.532827
9.8902,9.8264,9.4773,8.7023,8.2378,8.3776,8.8139,0,0,33,33,5,4,4,200,5.5,50.00,7,2,1.954,1623.2,74.0,980.0,0,0,02,0.012104755,0.532582

```

Obr. 23: Ukážka výpisu dát pomocou Shell Interface do Putty pre CSV v Matlabe

Dáta sú ukladané v nasledujúcom poradí:

Teplota okien z vonkajšej strany, teplota okien z vnútornej strany, teplota interiéru, teplota časti medzi karosériou a interiérom, teplota karosérie, teplota sedačiek, teplota vzduchu v kabíne, čas H, čas M, čas S, celkový čas simulácie v sekundách, výber stavu prietoku klimatizácie (F\_ac\_switch), výber stavu teploty klimatizácie (T\_ac\_switch), zvolený stav simulácie, výkon slnka, vonkajšia teplota, nastavená teplota klimatizácie, nastavený výkonnostný stupeň klimatizácie, počet ľudí v aute, hustota vzduchu, merná tepelná kapacita vzduchu, vlhkosť vzduchu, tlak vzduchu, hmotnostný prietok z klimatizácie, tepelný tok z klimatizácie, strieda.

##### 4.4.2.1 Putty Client

Pomocou Putty konzole sa ukladajú dáta do CSV súboru. Je preto potrebné nakonfigurovať Putty pomocou konfiguračného súboru AURIX, ktorý sa nachádza v prílohe (Príloha 7). Konfiguračný súbor definuje typ spojenia, port, rýchlosť

prenosu, miesto uloženia a názov vytváraného súboru. Meno vytvoreného súboru obsahujúceho dáta zo simulácie sa generuje automaticky a obsahuje dátum a čas spustenia simulácie.

V Exceli sa používa pre oddelovanie hodnôt bodkočiarka a v Matlabe čiarka.

Desatinným oddelovačom v Exceli je čiarka a v Matlabe bodka.

Z tohto dôvodu bolo potrebné vytvoriť pre každý spôsob ukladania údajov vlastnú konfiguráciu.

#### **4.4.2.2 CSV súbor pre Excel**

Pre automatické formátovanie je pre výpis údajov do CSV súboru použitá funkcia, ktorej ukážka použitia v kóde vyzerá nasledovne:

```
bodkaNAciarku(strieda);
```

#### **4.4.2.3 CSV súbor pre Matlab**

Výpis dát na obrazovku Putty je vykonávaný príkazom, ktorého ukážka použitia vyzerá nasledovne:

```
Ifx_Console_print("%f\r\n", strieda);
```

Pre spracovanie údajov v Matlabe je použitý skript CSVreadSkript, ktorý sa nachádza v prílohe (Príloha 4).

Pred použitím skriptu je potrebné vložiť do premennej filename správnu systémovú cestu CSV súboru. Skript po spustení rozdelí namerané údaje do samostatných vektorov, z ktorých vykreslí príslušné grafy.

#### **4.4.2.4 Ovládanie simulácie príkazmi cez Putty**

V prípade použitia Putty je potrebné pred spustením simulácie zadať simulačný stav jedným z nasledovných príkazov: stav1, stav2, stav3, stav4, stav5, stav6.

Následne sa simulácia spustí príkazom: start.

Simuláciu je možné počas jej vykonávania kedykoľvek pozastaviť príkazom: pause.

Následne je možné v simulácii pokračovať použitím príkazu: continue.

Pre podrobnejší opis jednotlivých príkazov je potrebné v Putty zadať príkaz: help.

Pre informácie o stave procesora je možné použiť príkaz: status.

V prípade potreby ukončenia simulácie stačí odpojiť napájanie mikrokontroléru.

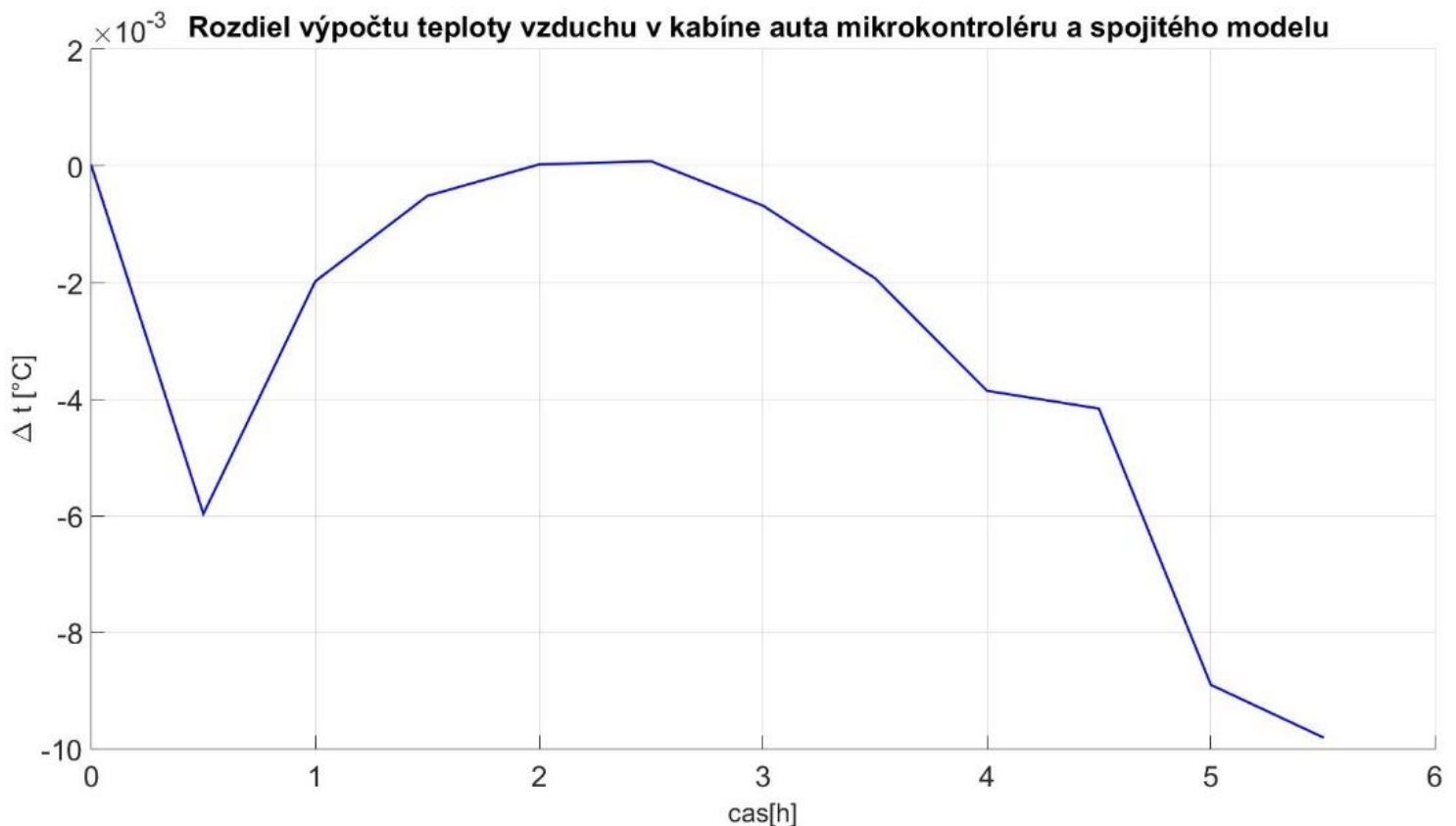
Vypnutím okna Putty sa prestanú ukladať simulované dáta do CSV súboru.

Každý príkaz v Putty je potrebné potvrdiť stlačením tlačidla ENTER na klávesnici počítača.

## 4.5 Porovnanie výpočtu mikrokontroléru a spojitého modelu

Jedná sa o porovnanie simulácie spojitého modelu v Simulinku a Real-time simulácie v mikrokontroléry.

Porovnanie výpočtu na nasledujúcom grafe Graf č. 11 bolo prevedené na simulačnom stave číslo 4, ktorého graf priebehu teplôt je zobrazený na grafe Graf č. 2, pri ktorom sú taktiež uvedené počiatočné podmienky daného stavu.

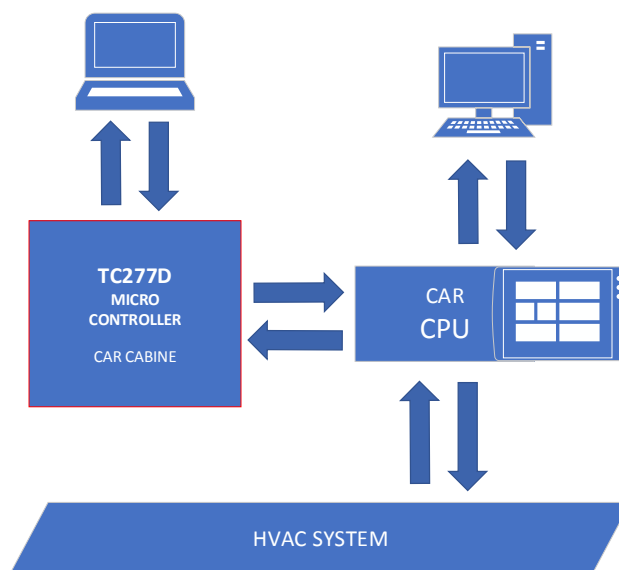


Graf č. 11: Porovnanie výpočtu mikrokontroléru a spojitého modelu

Zistená chyba je v rozsahu tisícín, čo je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené chybou zaokrúhľovania.

## 5 HIL SIMULÁCIA

Nasledujúci obrázok Obr. 24 v jednoduchosti opisuje spôsob, akým bola vykonávaná HIL simulácia s použitím vytvoreného modelu kabíny automobilu. Testovanie bolo vykonávané pomocou reálneho laboratórneho prípravku HVAC systému a riadiacej jednotky automobilu.



Obr. 24: Blokový opis HIL simulácie

Pomocou vývojového prostredia Eclipse bol v jazyku C naprogramovaný mikrokontrolér, v ktorom sme pomocou Putty konzole vybrali stav určený pre HIL simuláciu.

V danom stave sa údaje o klimatizácii, používanej pre simuláciu vyčítavali po spustení simulácie pomocou CAN zbernice z riadiacej jednotky automobilu, ktorej mikrokontrolér po vykonanom kroku simulácie odoslal údaj o teplote vzduchu v kabíne automobilu.

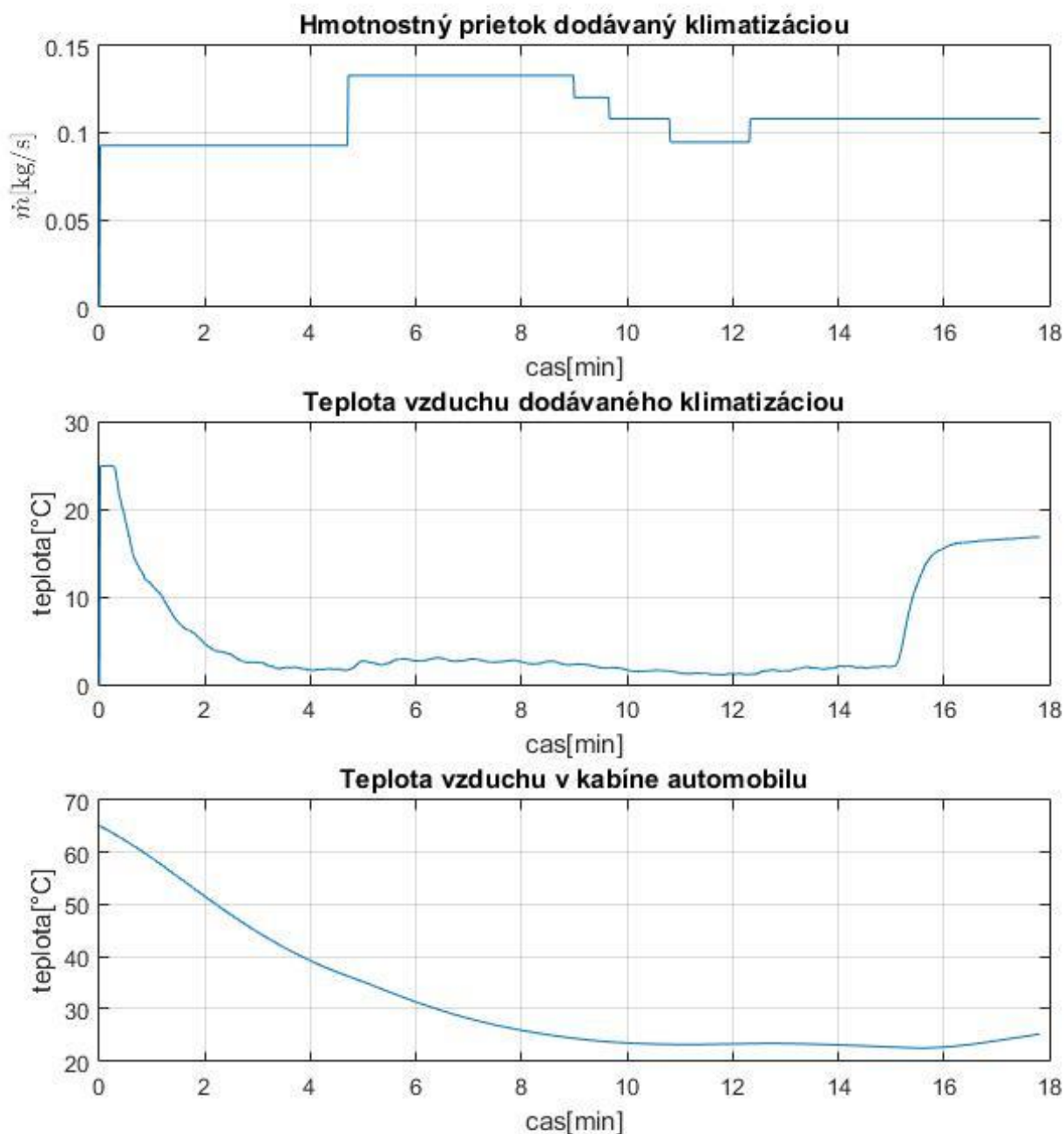
Pomocou Putty konzole sa zapisovali údaje o simulácii do CSV súboru.

Riadiacim počítačom bol vybraný konkrétny algoritmus pre ovládanie riadiacej jednotky automobilu, ktorá pomocou neho ovládala klimatizačný systém.

Z uložených údajov v CSV súbore bol následne vytvorený nasledujúci graf Graf č. 12 zobrazujúci teplotu a hmotnostný prietok zaznamenaný mikrokontrolérom pomocou CAN zbernice a teplotu vzduchu, ktorá bola odosielaná riadiacej jednotke automobilu.

Pomocou klimatizácie ( HVAC SYSTEM ) bol počas HIL simulácie ochladzovaný vzduch v kabíne automobilu, ktorá bola simulovaná pomocou vytvoreného kódu v mikrokontroléry TC277D.





Graf č. 12: Údaje namerané počas HIL simulácie

Predchádzajúce priebehy z grafu Graf č. 12 sú výsledkom HIL simulácie, ktorej počiatočné podmienky boli zadané pomocou hodnoty stavu 6, ktorý predstavuje zaparkované auto s nastúpeným človekom počas leta.

Počiatočné teploty jednotlivých častí kabíny boli zvolené v rozsahu od 29 °C do 56,4 °C.

Počiatočná teplota vzduchu v kabíne automobilu bola nastavená na hodnotu 65 °C. Slné žiarenie bolo nastavené na konštantný tepelný výkon 340 W, ako aj s konštantnou teplotou okolitého vzduchu 36 °C s vlhkosťou 35 % a tlakom 1013,25 hPa.

# ZÁVER

Po naštudovaní teórie modelovania tepelných systémov sme jej základné princípy popísali v rešerši. Na základe nadobudnutých teoretických znalostí sme vytvorili tepelný model kabíny automobilu za pomoci prostredia Matlab Simulink.

Vo vytvorenom modeli sme predpokladali jednotlivé namodelované časti kabíny za homogénny materiál, ktorého vlastnosti sme získali skombinovaním vlastností jednotlivých materiálov používaných pre danú časť.

Pomocou nami vytvoreného modelu je možné simulovať rôzne priebehy teplôt v kabíne automobilu v závislosti na zadaných počiatočných podmienok definovaných v skripte, v ktorom je možné vytvárať rôzne modelové situácie.

Preddefinovali sme celkovo 6 možných situácií. Výsledné priebehy niektorých modelových situácií sme uviedli na grafoch Graf č.1 až 4. Zmenou parametrov je tieto situácie jednoducho editovať, ako aj meniť ich počet.

Pre spresnenie výpočtov v simulácii sme vytvorili možnosť výpočtu hustoty vzduchu v závislosti na vlhkosti, je taktiež možné vyberať možnosť iba suchého vzduchu alebo počítať s konštantnou hustotou.

Pre overenie správnosti nami vytvoreného modelu sme uskutočnili meranie teplôt kabíny automobilu, z ktorého sme vypracovali protokol, ktorý je uvedený v prílohe. Z porovnania nameraných a odsimulovaných údajov je pri zohľadnení chýb merania možné povedať, že nami vytvorený model pracuje správne.

Po implementácii modelu do mikrokontroléru je po zohľadnení chyby výpočtu, ktorá je v rozsahu tisícín °C v porovnaní s modelom v Simulinku možné mikrokontrolér s modelom používať pre HIL simuláciu. Pre HIL simuláciu bolo taktiež vytvorené potrebné rozhranie pre komunikáciu s riadiacou jednotkou automobilu. Rozhranie zahŕňa prijímanie údajov týkajúcich sa klimatizácie pomocou CAN zbernice a odosielanie údaje o teplote vzduchu vnútri kabíny automobilu pomocou PWM s definovanou striedou v závislosti na teplote daného vzduchu, ktoré sa následne filtruje pomocou navrhnutého RC článku nahrádzajúci dynamické vlastnosti teplotných snímačov používaných pre meranie vzduchu v kabínach automobilov. Vytvorený model je teda možné používať pre vývoj riadiacich algoritmov klimatizácie automobilov pomocou HIL simulácie.

# LITERATÚRA

- [1] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 8072250302.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021441231.
- [3] SPAKOVŠZKY, Z. S. Thermodynamics and Propulsion [online]. [cit. 2017-09-06]. Dostupné z:  
<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/notes.html>
- [4] Air Properties [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d\\_156.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html)
- [5] PAVELEK, Milan. TERMOMECHANIKA - Přenos tepla konvekcí [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z:  
[http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17\\_Konvekce.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17_Konvekce.pdf)
- [6] PAVELEK, Milan. TERMOMECHANIKA - Přenos tepla zářením [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z:  
[http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19\\_Zareni.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19_Zareni.pdf)
- [7] Radiation Heat Transfer [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-transfer-d\\_431.html](https://www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-transfer-d_431.html)
- [8] Grey Body [online]. [cit. 11.12.2017] Dostupné z:  
<http://mechdept.tripod.com/matter/hmt/radiATION.htm>
- [9] GUYTON, Arthur C. a John E. HALL. *Textbook of medical physiology*. 11th ed. Philadelphia: Saunders, c2006. ISBN 0-8089-2317-X. Dostupné z:  
<http://jpkc.hactcm.edu.cn/2012yxslx/file/Textbook%20of%20Medical%20Physiology.pdf>
- [10] FIALA, Dusan, Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort [online]. [cit. 31.10.2017]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/35402573\\_Dynamic\\_Simulation\\_of\\_Human\\_Heat\\_Transfer\\_and\\_Thermal\\_Comfort](https://www.researchgate.net/publication/35402573_Dynamic_Simulation_of_Human_Heat_Transfer_and_Thermal_Comfort)
- [11] KIEHL J.T. a TRENBERTH K.E. . Earth's Annual Global Mean Energy Budget [online]. [cit. 31.10.2017]. Dostupné z:  
<http://aerosol.ucsd.edu/classes/sio217a/KiehlTrenberth1997bams.pdf>

- [12] LAMPINEN, Markku. Thermodynamics of humid air [online]. [cit.11.12.2017]  
Dostupné z: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/132918/mod\\_resource/content/3/Thermodynamics\\_of\\_humid\\_air.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/132918/mod_resource/content/3/Thermodynamics_of_humid_air.pdf)
- [13] Choose a Solver. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/types-of-solvers.html#bsfsnf4>
- [14] Laminárne a turbulentné prúdenie. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <http://physedu.science.upjs.sk/kvapaliny/lamturprud.htm>
- [15] CENGEL, Yunus. Heat Transfer. [online]. [cit. 09.11.2017]. Dostupné z: <http://uotechnology.edu.iq/dep-materials/lecture/secondclass/HeatTransfer14.pdf>
- [16] BERGANT R. a TISELJ I. . Simulations of the Near-Wall Heat Transfer at Medium Prandtl Numbers. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/36/115/36115751.pdf>
- [17] SPINDLER K. und FRANK A. .Umdruck zur Vorlesung: Grundlagen der Wärmeübertragung. [online]. [cit. 09.11.2017]. Dostupné z: <http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/waermeuebertragung/umdruck.pdf>
- [18] What is Hardware-In-the-Loop Simulation?. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html>
- [19] Simulink Coder - MATLAB & Simulink. *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink* [online]. Copyright © 1994 [cit. 21.11.2017]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simulink-coder.html>
- [20] Simulink. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
- [21] STERN, P. David. The Angle of the Sun's Rays.[online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <https://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Sunangle.htm>
- [22] HALL, Nancy. Mass Flow Rate. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mflow.html>

- [23] Kovové materiály automobilových konštrukcií - II Karoséria a karosárenské plechy [online]. Dostupné z: [http://www.materialing.com/materialy\\_auto\\_konstrukcii](http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii)
- [24] ASTM A525 Galvanized Steel. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=abbf07b7f93a4c358a0ddd194f5c18be>
- [25] Material Thermal Properties Database. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <http://www.firebid.umd.edu/material-database.php>
- [26] Aluminum 3105-H12. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=63d58cd8aa1a4e7a98471231b352442b>
- [27] SAE-AISI 1008(G10080) Carbon Steel. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/SAE-AISI-1008-G10080-Carbon-Steel>
- [28] VLACHOPOULOS J. a STRUTT D. . Basic heat Transfer and some Applications in Polymer Processing. [online]. [cit. 21.11.2017]. Dostupné z: [http://www.polydynamics.com/heat\\_transfer\\_revised.pdf](http://www.polydynamics.com/heat_transfer_revised.pdf)
- [29] Novodur P3H-AT. [online]. [cit. 21.11.2017]. Dostupné z: <http://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Novodur+P3H-AT/Styrolution+Group+GmbH/654/3bf176a2>
- [30] Specific Heat of Solids. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)
- [31] Specific Heat Capacity. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html)
- [32] Aluminum 6101-T6. [online]. [cit. 11.12.2017]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4303c5b908ff4cbd91a02fed7d4e8202>
- [33] Automotive Glazing | Saint-Gobain Sekurit. Saint-Gobain Sekurit | A leading manufacturer of automotive glazing for more than 80 years [online]. Dostupné z: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/glossary/automotive-glazing>

# ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1. Diferenciálne rovnice
- Príloha 2. Matica opisujúca dynamiku systému
- Príloha 3. Inicializačný skript a simulačný model (Spojité aj diskrétna verzia)
- Príloha 4. Skript pre vyhodnocovanie simulovaných priebehov z mikrokontroléru
- Príloha 5. Modelová referencia, Data Dictionary a Bus objekty modelu
- Príloha 6. Model kabíny v jazyku C pre mikrokontrolér
- Príloha 7. Konfiguračný súbor pre PUTTY klient
- Príloha 8. Skript a Simscape model pre návrh RC článku
- Príloha 9. Protokol o meraní a jeho prílohy
- Príloha 10. CSV súbory s nasimulovanými dátami pre stavy simulácie 1 a 4
- Príloha 11. Namerané dáta simulovaného snímača teploty vzduchu
- Príloha 12. Elektronická verzia Bakalárskej práce

Prílohy 1 až 12 sú uložené na priloženom CD.